

図解雑学地震

京都大学大学院教授 尾池和夫著



地震は、日本列島のどこにでも起こる自然現象です。

地震が恐ろしいのは、予告なしに突然足もとが揺れるからであり、ひとたび大地震が都市の直下に起こると、通常の備えでは対処できないほどの大きな災害が、広い地域にいつせいに発生するからでしょう。

さらに地震の正体を詳しくは知らないということもあるかも知れません。

よって日本に住む人々にとっては、地震という自然現象をよく理解し、共生をはかって震災の軽減を考えることが、生活の基本ともいえるでしょう。

そこで本書は、"地震という現象"を少しでも詳しく知っていただくために、予備知識がなくても読めるよう、できるだけやさしく解説しました。

目 次

はじめに

Chapter 1 地震はどこに起こるか？

世界の地震帯 地震の分布に埋もれる日本
地震学会が日本で生まれた 世界には地震を知らない人たちもいる
月震とは？ 月にも「地震」が起こる
リソスフェアとプレート ゆで卵のような地球
プレートの生産 プレートの離れていく境界
トランスフォーム断層 すれちがうプレート境界
プレートの出会う境界 大陸は成長する
プレート収束域 日本列島は世界一の地震帯
浅い地震と深い地震 もぐり込んだプレートに起こる地震
日本列島周辺の地震 日本は地震国
地震考古学 遺跡の中の地震の跡
地震活動の歴史 古文書の中に残された地震情報
地震とナマズ 要石が押さえる地震
北海道・東北・関東地方の地震 強震動と大津波
伊豆・小笠原諸島の地震 活発な火山活動と地震
中部・北陸・近畿・中国地方の地震 密集する活断層帯
四国・九州・沖縄の地震 フィリピン海プレートのもぐり込み
コラム 関東地震

Chapter 2 地震の起こるしくみ

地震の発生と大地の揺れ 地震ということばの意味
震源断層面上の破壊 地震は断層面に起こる
P波初動の押し引き 4象限分布の発見
くいちがいの弾性論 ずれが震源断層面を走る
震源断層面に働く力 押す力と引く力
破壊の伝わる速さ 破壊の停止するしくみ
多重震源 マルティプル・ショック
前震・本震・余震 地震活動の時系列
群発地震 先が読めない地震活動
余震の減り方 100年も続く余震活動
大きな余震の予報 地震予報の実践
実験室での再現 高温高圧下の岩石破壊
地震の引き金 未解決の問題
コラム 江戸の地震

Chapter 3 地震の大きさ

地震が震災を起こす 大震災の多い東アジア
マグニチュード 地震の大きさを測る
古地震の大きさ 古文書から決める地震データ
地震モーメントとは 巨大な地震の大きさを測る
モーメントマグニチュード 9.5 世界最大の地震
地震波のエネルギー 地震は地球エネルギーの消費
小さい地震ほど多い グーテンベルグ・リヒターの式
加速度・速度・変位の大きさ 地震計の特性が重要
マグニチュードと震度の関係 震源断層面の大きさと揺れ

気象庁震度階級 大地震のたびに変わる震度階級
コラム 鯨と鹿島大明神

Chapter 4 地震波の伝わり方

地球の中を通過した地震波 英字新聞が伝えた情報
地球を伝わる地震波 P波・S波・表面波
地球の全体像 地震波の反射、屈折、回折
変動帯の地殻構造 浅い地震は上部地殻に
地球の中を見る目 マントルから核へ
地球の CT スキャン 地球の X 線写真を撮る
異常にのびる震度分布 もぐったプレートを通る地震波
高温高压実験でわかること 実験室で再現する地球の内部
スーパープリューム 地球深部の対流
人工震源を利用する探査 資源探査への貢献
強震動の発生 地震工学という分野
コラム 都市の強振動を予測する

Chapter 5 地震現象を測定する

地震波を記録する 地震計の歴史
微小地震を観測する 高感度地震計ネットワーク
震央と震源 地震観測の仕事
日本列島の変形 年に数センチの変動
地殻応力場 日本列島の地下に働く力
謎に満ちた海底 海洋底での観測
海底に置く地震計 全地球をおおう観測網
大陸の下のマントルは冷たい 熱流量の測定
重力と地下構造 地表からの診断
地球磁場や電気現象を測る 地磁気・地電流・電気伝導度
地震直前の地電流と電磁波 電磁放射と発光現象
宏観異常現象 中国の臨震予報
コラム 深発地震の発見

Chapter 6 噴火・津波と地震

火山噴火にともなう地震 地震が引き起こす津波
三宅島の火山活動 時々刻々移動する地震発生場所
有珠山と三宅島の 2000 年の活動 噴火前の緊急火山情報
有珠山の噴火と低周波地震 噴火の予知
火山地帯の地震活動 雲仙岳と伊豆半島東部を例に
海底の巨大地震 何回トラフのプレート境界
津波の発生と伝わり方 数時間続く津波
日本の津波の事例 日本史上最大の津波
ゆっくり地震という地震 チリ地震津波
津波予報 揺れを感じたら予報に注意
コラム 地震の間

Chapter 7 活断層と都市

活断層とは何か 地表に現れた地震断層
地表地震断層 トルコの地震と台湾の地震
地震のマグニチュードと活断層 活断層は短くても大地震
活断層が都市をつくる 西南日本の大都市には大地震

竹の子の産地が破碎帯に沿う 名水百選と活断層
水平ずれと上下ずれ 水平にも上下にもずれる断層
活断層の調査 活動の履歴を知る
中央構造線の謎 いくつにも分かれる大地震
有馬－高槻構造線の歴史 トレンチ掘削調査は語る
六甲－淡路断層帯 1995 年兵庫県南部地震
活断層法の提案 日本学術会議の対外報告
京都盆地の構造 多くの活断層がつくった盆地
京阪神名古屋の活断層 特定観測地域の一つ
コラム 震災の情報

Chapter 8 震災の軽減

地震災害の軽減 備え・救出・復旧
地震の知識の普及 地震調査と広報
地震・火山庁の提案 日本学術会議の報告
大地震の長期予測 長期予測の精度を上げる
活断層の地震 大地震発生の可能性を知る
地震予知研究 50 年の歴史 地震予知連絡会の役割
地震活動期と静穏期 何回トラフの次の巨大地震
大地震前のドーナツパターン 西南日本内帯の地震活動期
地震活動の空白域 3つの種類の空白域がある
地震の前兆と直前予報 地震予報の成功例
地震予知と震災軽減 地震速報と余震の予報
強震動と震災軽減 日本地震工学会の誕生
コラム 地震発生の確率

はじめに

地震や火山の噴火や津波は、プレートが集まってくる東アジアの中でも、最も変動の激しい日本列島の、代表的な自然現象である。その中でも地震は、日本列島のどこにでも起こる自然現象である。地震はわたしたちが住む地球の自然現象であって、本来なれているはずであっても、都市直下の浅い地震は大きな震災をもたらすことがあって恐ろしい。

地震が恐ろしいのは、予告なしに突然足もとが揺れるからであり、ひとたび大地震が都市の直下に起こると、通常の備えでは対処できないほどの大きな災害が、広い地域にいつせいに発生するからであろう。それに地震の正体を詳しくは知らないということもあるかもしれない。

いま西日本は地震活動期に入っていて、この活動期は、まだ 50 年ほど続く。日本全体としては、地震活動は同じような調子で続いている。しかし西日本の特定の地域だけに限ってみると、地震活動期と静穏期がある。その西日本が活動期に入り、他の地域も活動を続けているので、今は日本列島の全域に大地震の可能性がある時期である。日本のどこでも、いつ地震が起こってもいいように備えておいてほしいと思う。

人が暮らす地表から上の大気圏に関する情報は、豊富に提供されていて、毎日の気象現象がよく見えるようになっている。それにひきかえ地下の状況は、見えない上に日本にはまだ定常的な情報提供のシステムがないので、まったくわからない。

地震を起こすプレートの相対運動や、それにともなう活断層運動は、日本列島の地形の基礎を作り上げてきた、というよりも列島そのものを生み出してきたといえる。とくに活断層帯では、数十万年続いている活断層運動で盆地や平野が生まれ、そこに都市ができた。だから内陸の大地震はそのような都市によく起こるということになる。日本人にとって、地震という自然現象との共生をはかって、震災を軽減することを考えていくことは、生活の基本である。

このような観点から、地震のしくみを少しでも詳しく理解していただき、足もとの地下に起こる現象の中で、わかっていることを少しでも知っていただくために、この本を書いた。予備知識がなくても理解できるように、やさしく説明することを心がけた。そのために多少の省略はあっても、できるだけ地震の研究者たちが解明してきたことを伝えたいと思った。また、地震の研究と震災の経験の中から、震災の軽減につながると考えられる研究者側からの提言にもふれてみた。地震の知識を深めるために役に立つことができればと願っている。

この本を仕上げるにあたって、多くの研究者の成果を参照させていただいた。また、原稿をまとめるのに京都大学地震学研究室の平井美佳さん、赤井真理子さん、株式会社オリンポスの伊藤笑子さんのお世話になった。地震学を始めて 40 年、わたしをずっと支えてくれた妻、葉子にこの 1 冊をさげたい。

2001 年 9 月 1 日(21 世紀最初の防災の日)尾池和夫

Chapter 1 地震はどこに起こるか？

世界の地震帯 地震の分布に埋もれる日本

大地が揺れると、「あっ、地震だ」と、わたしたち日本人は叫ぶ。日本では誰でも地震を知っている。もしあなたが、まだ一度も大地震を経験していないとしても、まわりにはそれを経験した誰かがかならず大地震のことを話してくれるだろう。

日本ではどこにいても、ときどき大地が揺れる。でも世界には地震を知らない人たちの国も、たくさんある。この本では、まず世界の地震帯を見ながら、あるいは、地震の起こらない国とくらべながら、地震はどのようなしくみで起こるかを考えてみよう。

わたしたちは、「大地震が、いつ、どこに起こるか」をいちばん知りたいと思う。ほとんどの人が「わたしの住む町に、大地震が近い将来起こるだろうか?」と質問する。残念ながら、地震学はまだ、このような質問には答えることができない。

でも質問を変えて、「地震はどこに起こるのですか」と聞き直すと、地震学者はたちまち雄弁になって世界地図を取り出し、詳しい説明を始めるだろう。

世界地図の上で、地震の起こった場所に点を打っていくと、その並びに少し幅の広い帯状の所と、幅の狭い帯状になっている所があるのに気がつく。幅の広い帯は、大陸と海洋の境界に多いことがわかる。その地図で、あらためて日本列島を見ると、アジア大陸の東にあり、太平洋に面していて、幅の広い地震の帯の中にすっかり埋もれてしまっていることがわかる。

幅の狭い帯は、おもに大洋底にあって、延々とつながって走っていることがわかる。

地震学会が日本で生まれた 世界には地震を知らない人たちもいる

それでは、地震がたくさん起こっている日本とくらべてみるために、日本と同じような大きさの島国で、誰でもよく知っているイギリスの場合を見てみよう。

地震の分布地図を見ると、イギリスの島々には地震はほとんど起こっていないことがはっきりとわかる。

さて話は 100 年以上さかのぼって、明治のはじめのころのことである。文明開化の日本は、西洋の文明に追いつこうと、イギリスをはじめとして、欧米から多くの人たちを官庁や学校に招いた。日本に招かれたそれらの人たちは、「御雇外国人」と呼ばれた。

その御雇外国人の中に、イギリスからやってきたジョン・ミルンと、ジェームス・アルフレッド・ユーイングという二人の物理学者がいた。彼らが来日して間もなく、1880(明治 13)年 2 月 22 日、横浜で中規模の地震が起こって、煙突が折れるという程度の軽い被害があった。

日本人にとって、この横浜の地震はたいした地震ではなかったが、地震を知らないイギリス人の物理学者にとっては、まるで天地がひっくり返るような大事件に思えたかもしれない。彼らは、さっそうくこの不思議な大地の自然現象に、研究のメスを入れることを考え、まず「日本地震学会」という、研究者の集まる会を発足させた。

これが、世界ではじめて「地震」ということばが使われた学会である。つまり、地震を知らない国の人々の体験がきっかけになって、日本が「地震学」の誕生の地となったのだ。それ以来 120 年、地震学は世界に広がり発展してきた。

月震とは？ 月にも「地震」が起こる

それでは、他の星ではどうだろうか。大地が揺れるという自然現象は、わたしたち人類の住む、この地球だけの現象だろうか。実は、そうではなくて、地球の衛星である月にも、同じような現象があることが、実際に月面に置いた観測計器にとらえられている。

月に起こる大地の揺れを、どのように呼んだらいいだろうか。「月震」という呼び方が使われていて、文部省(現在の文部科学省)で 2000 年に新しく編集された「学術用語集地震学編」にも、この単語が採用されている。ちなみに、英語では月震を moonquake という。

よく知られているように、人が月面に初めて立ったのは、1969年7月21日5時17分(日本時間)だった。近代技術の粋を集めて、アポロ11号の探索機が月面着陸に成功した。それ以来、月は人類が観測機器で直接に測定する対象になった。

アポロ計画では、月に地震計を置いて、この「月震」を観測した。今までに12000個ほどの月震の記録が得られており、観測した期間で割って平均すると、1年にほぼ3000回の月震が記録されたということになる。

月震にはいくつかの種類がある。その一つは、深い月震である。月面から800kmから1100kmの深さのところで起こっているらしい。地球にはこれほど深い地震はないが、月には、この深い月震がいちばん多い。深いことと規模が小さいことがその特徴で、もし月に立っていたとしても、大揺れで飛び上がる心配はない。

その他、隕石の衝突による月震、深さ300kmあたりで起きる比較的浅い月震もある。

リソスフェアとプレート ゆで卵のような地球

わたしたち人類が住んでいるのは、地球の固体部分の表面である。その表面から内部を固体地球という。地球はよく卵にたとえられるが、たしかに固体地球はちょうどゆで卵のような構造で、表面は殻でおおわれている。その殻の全体をリソスフェアと呼ぶ。

リソスフェアは比較的硬く、その下に比較的流動性のあるアセノスフェアがあり、さらにその下にメソスフェアという硬い物質の層がある。

また、リソスフェアには比較的熱を伝えにくい性質があって、地球内部の熱に対しても殻の役目を果たしている。一方、アセノスフェアはマグマを発生させる部分であり、そのマグマが地表に出ようとした場所では火山活動を起こす。

リソスフェアの厚さは、70km~150kmくらいで、地球と鶏の卵の大きさの比率で比べると、この厚さは卵の「殻」の厚さに相当する。ゆで卵と少し異なるのは、その「殻」が大小十数枚に分かれていることであり、その1枚1枚をプレートと呼んでいる。

いくつかのプレートの上には海があり、またいくつかのプレートの上には陸がある。その外側に厚さ100kmほどの大気圏がある。

プレートが一番上の部分には、地殻と呼ばれる部分があって、プレートの下部は上部マントルの一部である。マントルは、固体地球の深さ2900kmまで続いている。地球内部構造を、地殻とマントルというように分けるのは、構成する物質のちがいによる分け方である。それに対して硬さや流動性の面から見た分け方が、リソスフェア、アセノスフェア、メソスフェアという分け方なのである。

プレートの生産 プレートの離れていく境界

プレートとプレートの境界を見ると、離れていく境界もあり、すれちがう境界もあり、押し合う境界も、重いプレートが軽いプレートの下へもぐり込んでいる境界もある。

離れていく境界では、アセノスフェアから熱い岩が吸い上げられて冷えてかたまりながら、プレートが生産されている。逆に、プレートが出会ってもぐり込んでいく所では、もぐり込んだプレートの端が消費されていく。

たとえば南極プレートは、まわりがすべて離れていくプレート境界で囲まれている。このようなプレートが離れていく境界は、おもに海底にあり、大西洋中央海嶺や東太平洋の中央海嶺、インド洋を延々と走る細長い中央海嶺などが、プレートが生産されている境界である。

離れていくプレートの境界には、引っ張る力が働いて、岩盤が割れては地震を起こす。細長い海嶺をつくっているのは火山列であり、その海底火山からはマグマが海底に出てきて、海水に冷却されて硬くなるという現象を大量に起こしている。

この海嶺でできた溶岩に枕状溶岩と呼ばれるものがあるが、大昔の中央海嶺でできた枕状溶岩は、現在陸上でも見るができる。

もし、現在離れていこうとしているプレート境界を陸上で見たいのなら、大西洋中央海嶺が珍しく海面上に現れているアイスランドに行くといい。そこには、ギャオと呼ばれる大地の割れ目がある。

また、大陸が割れ、海嶺が生まれて間もない所もあり、例えば少しだけ陸が離れている紅海のような

な細長い海もある。

トランスフォーム断層 すれちがうプレート境界

大西洋などの大洋の中央海嶺では熱水が噴き出していたりするが、そこでの自然現象の観察は、たとえば地球上での生物の起源を知るためにも、たいへん重要なデータを提供することになる。だから、海嶺の近くはさまざまな分野の科学者たちの興味を引き、深海での調査の技術が進むとともに、多くのことがわかってきた。

海嶺は、ずっと続いているのではなく、途中で切れてずれている。そのずれた所では、生産されたプレートが、おたがいにすれちがって動くことになる。そのような、すれちがうプレート境界を、トランスフォーム断層と呼ぶ。文字通り海嶺が変換(transform)した断層である。

トランスフォーム断層では、すれちがう力が働いて、岩盤に横ずれの割れ目ができて地震を起こす。このような地震の並びから、深海底のプレート境界の位置を詳しく知ることができるのである。

トランスフォーム断層を先へたどっていくと、その延長上には、生産されてからの時間が経過して冷えて固くなったプレートと生産されたばかりのプレートとが接している部分ができる。この境界は同じ向きに運動していくので、すれちがうことはないから、地震を起こさずに一つのプレートとして移動していく。この境界は断層帯と呼ばれ、プレート内に記憶される。

中央海嶺から、両方へ広がっていくプレートは、海洋底を作る海のプレートで、海嶺から離れるにしたがって成長して厚くなり、やがて陸のプレートに出会ってもぐり込む。だから、海のプレートはつねに若いプレートであり、動きの大きいプレートである。

プレートの出会う境界 大陸は成長する

地球をおおっている十数枚のプレートの中には、ほとんど動いていないプレートもあるが、1 年あたり 10cm ほどの速さで、地球の表面に沿って水平に動いているものもある。これらは、さまざまな方向に、さまざまな速さで動いている。プレートが出会う境界では、プレートの端がアセノスフェアにもぐり込んでいる所もある。

水平に移動していくプレートには、大きい陸や小さい島が乗っていて、それらがやがてもぐり込む境界まで到達すると、島は相手の陸側にくっついて陸地を広げていく。

プレートが出会う境界には、圧縮によって、押しつぶせの褶曲構造や断層帯ができる。また、マグマの上昇によって火山帯ができ、岩石が高温・高圧のもとで変成作用を受けた広域変成帯が発達する。これらの作用で山脈が形成されるしくみを造山運動という。

大陸プレートは、一般に古くて軽いのが特徴であり、中心部は数十億年の歴史を持ち、造山帯の形成とともに、まわりに次々と岩盤がつけ加えられて、大陸は成長している。

海のプレートのもぐり込み口には、海溝やトラフと呼ばれる、細長く深い海底の谷ができる。また、もぐり込み口の陸側には、島弧と呼ばれる弓なりの島の並びができる。島弧の内側、つまり陸のプレート側には海盆や縁海が発達する。また島弧ではなくて陸弧ができていることもある。

西太平洋のプレートの集まってくる境界には、日本列島などの島弧が発達し、東太平洋には、アンデスなどの陸弧が発達している。日本列島も 1500 万年前には陸弧であったと考えられている。

プレート収束域 日本列島は世界一の地震帯

日本列島は、世界でも珍しいほど、プレートがどんどん集まってきている所にできている。日本列島の陸地は、プレートが運んできた多くの島がくっついて成長している。

プレートが出会う境界では、海洋プレートのもぐり込み口に海溝やトラフができることは前項で説明したが、海溝というのは、大洋底の水深 6000m 以上の細長い谷地形をいう。海溝でもっとも深い所はマリアナ海溝のビチアズ海淵であり、深さは 10,920m である。

海溝よりも浅い谷状の部分は、一般的に舟状海盆とかトラフと呼ばれるが、トラフは必ずしも、も

ぐり込むプレート境界だけにできるのではなく、中には海底が拡大しようとしている所にできたトラフもある。

プレートがもぐり込む所では、陸側のプレートの端を引きずり込んで沈降させようとする力が働く。プレート境界がしっかりとかみ合っている所では、陸のプレートの端は、大きく引きずり込まれた後、プレート境界が割れて跳ね上がる。そのとき巨大地震が起こることになる(157 ページ)。

このようなしくみの地震をプレート境界地震とか、プレート間地震と呼んでいる。また、海溝型地震とか沖合型地震と呼ぶこともある。地震の中でも最大級の規模のものが起こるのが、この型の地震の特徴である。

このような海溝型地震では、深い海の底が動くから、大津波を起こす。近くの沿岸では、強震動で建物や堤防などが崩れた直後に、大津波が押し寄せることになり、遠方の沿岸にも津波が届く。

浅い地震と深い地震 もぐり込んだプレートに起こる地震

日本の南にあるフィリピン海プレートは、生産される境界を持っていないので、もっぱらもぐり込んで行くだけである。だから、このプレートは、やがて地球上からなくなってしまう運命にある。

もぐり込んだプレートの端の物質は、マントルの中を移動して、また上昇してくることもあると考えられている。よって地球の中には何億年も続いて起こっているマントル対流があると考えられる。

プレートがもぐり込むと、そのもぐり込んだプレートの中にも地震が起こる。だから、プレートのもぐり込み帯では、深発地震帯という長い帯ができる。その深発地震帯は、プレート境界に対して島弧あるいは陸弧側にできることになる。

震源が 60km よりも深くなると深発地震と呼ばれる。その場合、それより浅い地震は浅発地震と呼ばれる。深い地震と浅い地震という言葉を使うこともある。深さ 60km で呼び名を変えるのは単なる習慣で、それほど深い意味はない。地震学者によっては、たとえば 100km の深さで分ける場合もあり、さまざまである。

海洋プレートの端が沈み込んでいる所では、深い地震の分布が地表から 660km の深さにまで達していることがある。この深い地震は、プレートのもぐり込んでいる状況を知るのにたいへん役に立つ。

世界の深い地震の分布図を見ていると、地震分布が 660km の深さまで達している地域がいくつかあることに気がつく。南米のアンデス山脈、日本列島、フィリピンやインドネシア、フィジー、トンガなど、陸弧や島弧がよく発達した地域に、深い地震が活発に起こっていることがわかる。

日本列島周辺の地震 日本は地震国

プレートのもぐり込む運動でできた島弧の典型として、日本列島を詳しく見てみよう。日本列島は千島、東北日本、伊豆小笠原、西南日本、琉球など、いくつもの島弧からなる弧状列島である。

明治になって日本政府は中央气象台を置き、気象のデータをとる仕事とともに、地震のデータをとることを国の仕事として始めた。その仕事のおかげで、1885 年以後、日本列島の全域の、大地震や中規模地震のデータが得られるようになった。

このデータをもとにして、日本列島とその周辺のどこに、どのような地震が起こるのかを見渡してみることしよう。

地震の規模は、マグニチュードで表す。簡単に書くためには M という字を使う。M の詳しい説明は第 3 章ですることにして、ここでは、M8 は巨大地震、M7 は大地震、M6~5 は中地震としておこう。

巨大地震、つまり M8 クラスの地震はプレート境界に起こる。とくに太平洋プレートがもぐり込む千島海溝、日本海溝に多く起こり、フィリピン海プレートがもぐり込む南海トラフにも起こる。東北・北海道の西側、すなわち日本海の東縁部にも起こる。ここは、プレートのもぐり込みが始まっている場所である。

M7 クラスの大地震はプレート境界にも起こるが、何度も浅い大地震を起こした跡である内陸部の活断層帯や火山の近くにも起こる。活断層帯は、とくに近畿から中部地方、伊豆地方、九州などに多い。

M6 クラスの中規模の地震は、全国どこにでも起こるといえる。さらに M5 や M4 の小規模の地震

の分布図を描くと、日本全体が地震の記号で埋まってしまう。

地震考古学 遺跡の中の地震の跡

日本は長い歴史のある国で、古い地震のことがよく調べられている。その成果も日本の地震のことを考える上で重要な情報になる。ここで、そのような昔の地震のことを考えてみよう。

地表に近い地層に砂と水をたっぷり含んだ層があると、強い地震動で地層が流れることがある。地盤の液状化と呼ぶ。流れる水に土が溶けて液状になるのではなく、振動で地層に含まれる水の圧力が変わり、砂粒と砂粒が離れてしまって、地層全体が液体の性質になるのである。その地層が、上にある地層の割れ目から地表に噴き出してくる。だから揺れがおさまった後には、地表に水と砂が噴き出した跡ができる。これは噴砂と呼ばれている。

ところで、考古学の遺跡調査のときにもこのような噴砂の跡がたくさん発見されて、大地震の場所や年代がわかる場合がある。このように、考古学の調査のため発掘された遺跡の中に、噴砂などの大地震の跡が残されているのに注目した地質学者がいる。その学者は寒川旭(さんがわあきら)で、彼はそのような遺跡を手がかりに、日本の過去の大地震に関する多くの発見をして、この新しい研究分野を「地震考古学」と名づけた。

日本では、長い期間にわたって存在する史料から、大地震がずいぶん詳しく調べられているが、それを補う役割を地震考古学が果たしつつある。

地震の跡は何を語ってくれるかを考えてみよう。遺跡調査をおこなう場合、まず地層の中の遺物を調べて地層の年代がわかる。その中に噴砂の跡があれば、大地震発生の時代がわかるのである。

地震活動の歴史 古文書の中に残された地震情報

考古学のための発掘調査は、日本全国でいつもおこなわれているから、調査の機会はたくさんある。その中からさまざまな現象が発見され、地盤の研究が進む。大地震の強震動を受けたことがわかっている地盤で、液状化などが起こっていなかったという情報も、もちろん貴重な地盤研究の資料となる。

逆に、地震の知識が考古学や歴史の分析に役立つこともある。広域に震災をもたらす大地震は、離れた場所の地層の年代をくらべるものさしの役割を果たすこともある。地盤の液状化などがなくても、大震災で瓦礫が大量に発生したことが、一つの手がかりになることもある。

また、大地震の発生した事実が、焼失した集落、形を変えてしまった古墳、道のつけ替えなど、いろいろな歴史の謎を明解に解き明かす手がかりになることもある。

一方、日本人は、古くから大地震の記録を克明に書き残してきた。このような古文書の調査を進めていくと、場合によっては各地の多くの古文書を照らし合わせて、年月日のみではなく「何時」まで地震発生の時が判明することもある。

その史料の分析が地震の長期予測にも役立つ情報をもたらす。大地震は、同じプレート境界や同一の活断層でくり返して発生するから、過去数回の地震発生のくり返しの特性がわかると、将来の地震発生時期を推定する手がかりがそこから得られるのである。

さらに、古文書の記録から、将来の大地震の時の噴砂や崖崩れなどの震災の状況を予測することもできる。

地震とナマズ 要石が押さえる地震

日本では、地震と言えばナマズである。古い歌に、「揺るぐともよもや抜けじの要石鹿島の神のあらんかぎり」というのがある。この歌からわかるように、鹿島大明神は、要石で地下の龍蛇を押さえていて、地震が起こるのを防いでいるとされた。

12世紀末の暦には、龍が諸国を取り巻き、それを「地震虫」と呼ぶ、と書かれていた。鹿島神社の要石は、日本を取り巻く大魚の頭と尾が重なっているのを、そこで押さえているとされた。

1592(文禄元)年の秀吉の手紙には「ふしみのふしん、なまつ大事にて候まゝ」と書かれており、伏

見城の普請(建築工事)でナマズに用心せよと命じている。これが地震とナマズの関係を示す最古の史料のようだ。

要石が押さえる龍蛇がナマズに変わったのは江戸時代の初期といわれている。この要石と鹿島の神とナマズとが、江戸時代の色刷りの鯰絵にたくさん登場した(右ページ上)。

1855年11月11日(安政2年10月2日)夜の江戸の大地震の直後には、地震鯰の版画が大量に売れた。死者1万人を超える大震災の中で、実にユーモラスな鯰絵が大量に出まわったことは、その時代の社会を知る上でも重要な出来事であろう。

鯰絵では、地震を起こしたナマズをこらしめている内容が多い。中には金持ちの金を再分配させるナマズや、「世直し」の考えも見られる。また大工や左官がナマズを接待する場面を描いたものもある(右ページ下)。いずれにせよ、地震直後に出まわった大量の鯰絵は、震災の情報伝達に大きな役割を果たしていたようだ。

北海道・東北・関東地方の地震 強震動と大津波

江戸時代までに起こった地震も、古文書や考古学遺跡の調査から、だんだん明らかになり、約1500年の長期間にわたって日本各地での地震の起こり方を知ることができるようになっている。その情報とプレートの知識などを合わせて、数項目にわたって北海道から沖縄まで地域別に、地震の起こり方の特徴を概観してみよう。

まず、東北日本弧と呼ばれる地域である。ここでは太平洋プレートが、東側の沖の日本海溝から、東北日本弧の下へもぐり込んでいる。そのもぐり込み口に巨大地震が起こる。

1952年(M8.2)と1968年(M7.9)の2回の十勝沖地震、さらに、1973年の根室半島沖地震(M7.4)などが、北海道の東のプレート境界に最近起こった地震の典型であり、強震動とともに大津波が沿岸を襲った。三陸沖には1896年(M8.5)や1933年(M8.1)に大地震があつて、いずれも大津波で被害を出した。

日本海側にもプレート境界があり、1983年の日本海中部地震(M7.7)や1993年の北海道南西沖地震(M7.8)が起こった。

関東の南側にもプレート境界の巨大地震が起こる。1923年の関東地震(M7.9)は、とりわけよく知られている。

東北地方の内陸部には活断層帯もあり、1896年の陸羽地震(M7.2)などが起こった。さらにこの地域では、島弧に平行に火山が列をなしていて、火山活動にともなう中規模地震も多い。

以上は浅い地震だが、この地域の下にもぐり込んでいる太平洋プレート内には深い地震がたくさん起こり、その並びは、はるかロシアの沿岸の深さ660kmあたりにまで続いている。

伊豆・小笠原諸島の地震 活発な火山活動と地震

伊豆半島は、フィリピン海プレートに乗って、日本列島にまで南方からやってきた島であつた。その伊豆半島の東側の大島あたりから南へ、新島、神津島、三宅島、八丈島と東京都下の島々が続き、さらに父島、母島と続いている。

これらの島々の下にも、やはり太平洋プレートがもぐり込んでいて、そのもぐり込み口は伊豆・小笠原諸島の東側にある伊豆マリアナ海溝である。そのもぐり込んだプレートの先には深い地震が起こるが、もぐり込みの角度は鉛直に近く、深さは660kmに達している。深い地震にも、たとえば1984年3月6日に起こった深さ450km(M7.9)の大地震もある。

伊豆半島には活断層帯があつて、1930年の北伊豆地震(M7.3)、1974年伊豆半島沖地震(M6.9)、1978年伊豆大島近海地震(M7.0)などが起こった。地震の名に「沖」とか「近海」とかの字があるが、これらの震源断層(48ページ)は、いずれも陸に達していた。

この地域の島々は火山の島々であり、火山活動にともなう中小規模の地震が、あちらこちらでたくさん起こる。抜き出た大地震がなく、地震が群をなして起こる活動は群発地震と呼ばれる。

群発地震の例をあげてみよう。2000年6月26日18時半ごろから、三宅島で地震が起こり始め、急激に増えた。三宅島測候所は19時33分「噴火の恐れ」という「緊急火山情報」を出した(151ページ)。その後、地震活動は広がりを見せて、神津島や新島付近でも中規模地震が起こり、震度6弱の大

揺れをくり返し記録した。7月末までに震度6弱は計4回記録され、はげしい群発活動になった。

中部・北陸・近畿・中国地方の地震 密集する活断層帯

本州の中央部に住んでいる人たちは、大地震が内陸直下で起こるという恐ろしさを知っておいてほしい。この地域の特徴は、南に南海トラフと呼ばれるプレート境界があり、そこからフィリピン海プレートが本州の下へもぐり込んでいるという構造である。中部地方では、さらにその下にもぐり込んだ太平洋プレートがあって、プレートの三重構造ができている。また内陸部には、たくさんの活断層帯があるため大地震がよく起こるという特徴がある。

プレート境界地震では、1944年の東南海地震(M7.9)、1946年の南海地震(M8.0)が、20世紀の巨大地震として知られる。内陸の大地震では、1995年兵庫県南部地震(M7.3)を忘れることができない。

この大地震は、1995年1月17日の早朝に発生し、死者6千人余り、負傷者4万人以上、住家の全壊11万戸以上、火災285件などの被害を出し、「阪神・淡路大震災」と呼ばれている。死者の多くが、家屋の倒壊と火災によるものであった。

活断層帯の大地震は、この1995年の他に、20世紀に起こったものだけでも、1909年姉川地震(江濃地震ともいう)(M6.8)、1925年の北但馬地震(M6.8)、1927年の北丹後地震(M7.3)、1943年鳥取地震(M7.2)、1948年福井地震(M7.1)、1961年北米濃地震(M7.0)のように、たくさん起こっている。

1891年には、日本の内陸で最大級のM8.0という地震が中部地方に起こった。これは濃尾地震と呼ばれている。日本全体でこの地震の揺れが感じられるほどだった。濃尾地方では震度7相当の大揺れがあり、遠く仙台や鹿児島でも、震度1の有感報告があった。

四国・九州・沖縄の地震 フィリピン海プレートのもぐり込み

四国から沖縄の地域の南東側には、フィリピン海プレートのもぐり込み口がある。そのプレート境界は、四国沖では南海トラフ、九州の南から台湾近くまでは南西諸島海溝と呼ばれる海底の長い谷になっている。

このプレート境界に沿って、四国沖では南海地震のような巨大地震が起こり、九州南部の日向灘地域では、M7クラスの大地震がたびたび起こる。南西諸島海溝では、1911年の奄美大島近海地震(M8.0)のような巨大地震も起こる。いずれも津波をともしなう。

九州の内陸部には活断層帯が発達しているが、20世紀までの歴史上には大地震を起こした記録があまりない。熊本県にある日奈久断層帯には、現在、中小規模の地震がたくさん起こっていて、活動度が高くなっていることが注目される。

南西諸島の内側、つまり大陸側には、島々に平行に沖縄トラフと呼ばれる谷状の海底地形があり、そこが開いていくような断層運動が見つかっていて、開く運動にともなう地震が起こることがある。このような開く運動の分布は、さらに北の方へ、別府ー島原地溝帯と呼ばれる火山地帯へつながっている。

南西諸島海溝からもぐり込んでいるフィリピン海プレートの先端にはやや深い地震もあり、震源分布は深さ200kmに達している。

沖縄県南西部は、M7クラスのプレート境界地震のよく起こる地域である。20世紀だけでも、1915年石垣島の地震(M7.4)、1947年の西表島西方沖の地震(M7.4)、1958年の石垣島付近の地震(M7.2)、1966年の台湾東方沖地震(M7.8)など、いずれも被害があった。

関東地震

1923年の関東地震では、多くの人命とともに、当時の金額で55億余円の財産が失われた。東京帝国大学の地震学教室も火の粉をあびて燃え上がったが、地震計や地震の記録などは職員が守った。

このとき、地震学教室主任の大森房吉(ふさきち)は、第2回汎太平洋学術会議でオーストラリアへ出張していた。会議が終わって、大森はシドニーのリバービュー天文台長の案内で地震観測所を訪れ

た。大森がちょうど地震計の前に立ったとき、現地の 13 時 9 分、地震計の針が大きく振れだした。大森は記録から東京付近の大地震と気付いて愕然とした。

大森は大地震の 1 ヶ月後に亡くなり、かねてより東京の大震災を警告していた今村明恒(あきつね)がその後を継いだ。

Chapter 2 地震の起こるしくみ

地震の発生と大地の揺れ 地震ということばの意味

この第2章に入るまでは、地震ということばを、何の説明もせずに使ってきたけれども、実はこのことばの意味は歴史的に大きく変化してきたのである。あらためてここで地震ということばの意味を考えたい。

昔から、人びとは大地が激しく揺れる現象を知っていて恐れていた。もともとその大地の揺れを地震と呼んでいた。しかし、19世紀には、この大地の揺れが、震源から地中を伝わる地震波によって起こされるものであることがわかり、さらに20世紀後半になると、地下の岩盤の中に発生した断層面上のずれ破壊から地震波が伝わるという、地震現象全体のしくみが明らかになった。今では、地表で地震動を体で感じとる市民と、地震計で観測して地下の破壊の発生を計算する専門家との間とでは、地震現象の認識に大きなずれができてしまって、地震ということばに混乱が生じるようになった。

混乱をさけるために、地震学の専門家は、地下の地震発生を「震源断層面上の破壊の発生」というように表現し、そして地表の揺れは地震動とか、単に揺れと呼び、そしてそれらの全体をまとめて地震現象と呼ぶ。

たとえば九州で地震があったとき、テレビのニュースなどで「九州全域で地震がありました」ということばの使い方をするが、これを詳しくいうと、「熊本市の地下、深さ10kmあたりに震源断層面上の破壊が発生し、地震波が伝わって九州全域で揺れがありました。震源断層の規模はマグニチュード6.0で、各地の揺れの震度は、熊本で震度6強…」というようになるのではないだろうか。

震源断層面上の破壊 地震は断層面に起こる

地震は岩盤の中で発生する。その発生のプロセスを震源過程と呼ぶ。震源過程を詳しく調べるのが地震学者の仕事の中で大きな位置を占めている。

一つの地震が発生するという現象は次のように表される。岩盤に力が加えられると、その岩盤の中のある範囲がひずみ、岩盤の中には、そのひずみを戻そうとする力が発生する。その力を応力(ストレス)と呼ぶ。ひずみが岩盤の強さの限界にまで大きくなると、岩盤は破壊する。地下深くの岩盤には、重力の作用で全体に圧縮する力が働いているから、岩盤の破壊は、破壊面に沿ってずれが起こるような型の破壊になる。このずれ破壊の面を、この本では「震源断層面」と呼ぶことにする。

このような破壊は、岩盤の中のある点から始まり、破壊面が四方へ急激に成長していくように起こる。破壊の始まった点を震源と呼んでいる。震源断層面の全体から地震波が発生して、岩盤の中をあらゆる方向に伝わっていく。だから、大地震、つまり震源断層面の大きな地震では、震源から数十kmも離れている地域でも、震源断層面に近ければ大揺れになる。

岩盤を伝わってくる地震波を地震計が記録する。その記録全体を分析することによって、震源断層面の広がり方や、大きさ、平均的なずれの量や方向などが計算で求められる。もし、大地震の震源断層面近くに、大揺れに耐える強震計と呼ばれる地震計がたくさん置いてあったら、震源断層面上の各点で、どのようにずれ破壊が起こったかを、こまかく知ることができて、研究が大きく進展する。

P波初動の押し引き 4象限分布の発見

それでは、地震現象のしくみが明らかになってきた地震学の歴史を少し詳しく見ることにしよう。

1909(明治42)年に、京都帝国大学の総長であった菊池大麓(きくちたいろく)が、東京帝国大学の大学院を出た志田順(しだとし)を招いて、京都市の北部にある上賀茂地学観測所に、地球物理学の拠点を作る仕事を依頼した。

赴任した志田は、地震計の記録をもとに地震波の初動の研究を始めた。地震計で記録される最初の揺れであるP波は縦波であるから、震源に向かって引く動きか、震源から押してくる動きかの、どちらかである。それに着目し、志田は初動の押し引きの分布を地図に描いた。すると、初動の押しと引きのデータが、右ページの図のように、十字に交わる線で分かれた領域に交互に分布する(4象限分布

という)ことがわかった。この発見は、震源のしくみを解き明かす研究の基本となり、この4象限分布を理論的に説明することが、地震学の進む大きな道の一つとなったのである。志田が学会でこの発見を発表したのは、1917年のことであった。

地下の岩盤にはどのような力が働いて破壊が起こるのだろうか。地震が起こる岩盤は、外から働く力で伸び縮みする弾性体の性質を持っているが、その弾性体の一点に働く力源により、遠方にどのような波が伝わるかということは、理論的にすでに説明されていた。次に、右ページの図のように反対方向に働く二つの力を組み合わせた偶力を持つ力源モデルが考えられた。これはシングルカップルという。さらに逆向きの二つのシングルカップルによる、全体として偶力を持たない力源が考えられ、これはダブルカップルと呼ばれた。

くいちがいの弾性論 ずれが震源断層面を走る

ある場所に一つの大地震が起こった後、震源断層面は比較的早く固結して、両側の岩盤が一体となってひずんでいく。ひずみが蓄積して、断層面をずらす力が、面の固着力を超えたとき、断層面上にすべりが起きて大地震を起こし、両側の岩盤のひずみが解消される。

このような考え方は20世紀の前半にすでにあったが、理論的な研究が進んだのは、精度の高い地震波の記録が得られるようになった20世紀後半になってからであった。地震波の記録が増えるとともに、まず、ダブルカップルの力源モデルが、観測されるデータによく合うということがわかってきた。

1960年代に入って、震源の理論が発展し、震源断層面上での動きと、遠方で観測される地震波との関係が詳しく検討されるようになった。最初にわかった重要なことは、ダブルカップルの力源による地震波を表す数式と、岩盤の内部の割れ目に、くいちがいが生じたときの地震波を表す数式とが、理論的に同じになるということであった。つまり、ダブルカップルの力源モデルは、断層運動を表現するモデルであるという証明ができたのである。この理論は「くいちがいの弾性論」と呼ばれた。

これによって、震源断層面とダブルカップル力源を想定して、実際の地震と同じような地震波を計算機で合成することができるようになったのである。さらに現在では、岩盤のある点に働くさまざまな力の組み合わせを考えて、それを一般的に表現するモデルが導入され、先に述べたダブルカップルは、この一般的モデルの中の、ある特定の場合として表現されるようになった。

震源断層面に働く力 押す力と引く力

逆向きの二つの偶力を組み合わせたダブルカップルの力源モデルは、数学的な表現であるため実感としてわかりにくいだが、これらの力は、強さが同じで直交する方向に働く、「押す力」と「引く力」の組み合わせに置きかえることができる。このほうが岩盤の中に働いている力の状態を理解するのに適している。これによって、地震を起こす「押す力」や「引く力」が、地下でどのような向きに働いたかを、震源断層面のでき方から推定することができるようになる。たくさんの地震について、このような力の向きを知ることができた地域では、その地域全体にどのような力が働いているかという重要な情報が得られることになる。

震源に働いた「押す力」の方向と「引く力」の方向と、それらの力の傾き方などから、地下の岩盤に働いている力の状態を知ることができ、震源断層面の動きの特性を知ることができる。

押す力と引く力が水平面に沿って働くと、震源断層面には水平ずれ運動が起こる。押す力が水平で、引く力が上下方向に働くと、震源断層面は傾斜して、上盤側がのし上がるようにずれる。これは逆断層運動と呼ばれる。押す力が上下方向で、引く力が水平方向だと、傾斜した断層面を、上盤側がすべり落ちるようにずれる。これは正断層運動と呼ばれる。

ある地域のたくさんの地震から、押す力と引く力を求めると、その地域の岩盤に働く力の特徴が浮きぼりになる。日本列島はプレートが集まって押し合っているために、押す力が水平に働く地震が多い。すなわち、水平ずれ運動や逆断層運動による地震が多い。

破壊の伝わる速さ 破壊の停止するしくみ

震源断層面上のずれ破壊は、ある点から起こり始めて伝わる。伝わり方にはいろいろなパターンがあるが、伝わる速度は地震波の S 波より少し遅いのが普通で、秒速 2~4km 前後である。地震波は岩盤を伝わって世界中の地震計で記録されるから、その記録された地震波を集めて計算することにより、震源断層面上のずれの伝わる方向や速さ、震源断層面の形などを詳しく求めることができる。

震源断層面の面積、くいちがいの大きさと方向、ずれの広がる速さ、ずれの起こった岩盤の強度などがわかると、その地震を起こした力の大きさやひずみエネルギーなどを計算することもできる。

実際の地震を起こすエネルギーは、岩盤の内部にひずみエネルギーとして蓄えられている。岩盤がひずんで、それにともなうストレスが蓄えられており、そのストレスを解放するように破壊が生じ、ずれが発生する。物理学的に言えば、静的なひずみエネルギーが、地震波という動的なエネルギーに転化されるシステムが地震であるということになる。

地震が起こることによって、震源断層面上とその近くではストレスが解放される。その解放されたストレスの大きさを、ストレスドロップ(応力降下)といい、その大きさは震源断層面の長さに反比例し、断層面上でのずれの大きさに比例する。

岩盤の中で小さい破壊はたくさん発生しているが、大きな破壊面が発生することは少ない。岩盤の破壊面が成長するしくみと、その成長を止めるしくみを解明することが、地震の大きさがどのような法則で決まるのかという問題を解くために重要な研究課題である。

多重震源 マルティプル・ショック

ある程度以上の規模の地震をよく調べると、震源断層面が次つぎと、いくつも連続的に発生している。一つの大地震が、実はいくつもの地震の重なりで構成されているわけである。このことは地震計の性能がよくなるにつれて、どんどん明確になってきた。長周期の地震波だけを見ていると、平均化されて一つの大地震と見られていた地震が、短周期の成分までをきちんと記録して調べてみると、破壊が伝わっては止まることを、何回もくり返している様子がわかる。

大地震では、大きな震源断層面上に、不均質にずれが分布しており、断層面に沿って、強い地震波が発生する部分もあれば、弱い地震波が発生する部分もある。このような震源モデルを、多重震源モデルという。このような研究は、短い時間をおいて連続する地震、すなわちマルティプル・ショックの発見から始まって、地震観測網の発展とともに、しだいに詳しい分析がおこなわれ、今では大地震は多かれ少なかれ、多重震源であるということがわかってきた。

震源断層面上では、ずれの量も向きも、破壊の伝わる速さや広がり方も、いろいろな面で不均質に分布すると考えられ、これらを求めるためには多くの強震計の配置が必要である。震源断層面上で、とくに大きなずれのあった部分をアスペリティ、破壊が伝わるのを阻止する強い部分をバリアと呼ぶ場合もある。

震源断層面上のずれ破壊の伝播がどこで止まるか、また、どのようなしくみで止まるか、あるいはどのようなしくみで別の断層面に連鎖的にジャンプして、ずれ破壊を続けるか、というような問題が、地震学の大きな研究テーマとなっている。

前震・本震・余震 地震活動の時系列

大地震の起こるプレート境界や活断層の近くでは、プレート境界や活断層全体にずれを発生させるような大地震前後に、それより比較的小さい中小規模の地震が増えることが多い。

本震の直前に、本震の震源、つまり破壊の始まる位置の近くに起こる地震を前震、本震発生直後から本震の震源断層面がさらに広がったり、その近くに破壊が生じたりして起こる地震を余震と呼ぶ。その地域特性によって前震や余震は多かったり少なかったりする。

前震は、時間的にも空間的にも集中的に発生するが多い。また、地震を起こす押し引きの力の方向が一定しているという特徴が見られる。集中的に発生していた地震の群が、急に止まって静かになった直後に本震が起こった事例が多く知られており、地震予報に成功した 1975 年の中国海城地震では、この静穏化の現象が、臨震予報を出すきっかけになった、また、1978 年の伊豆大島近海地震の

ときにも、小地震群の静止が緊張感のもとに観察されていた。

本震は、地震の群の中で、結果的に最大のマグニチュードだったものをいう。抜きん出て大きな地震が一つの場合はわかりやすい。

余震は、大地震の後に続く中小地震である。本震のくり返し時間間隔が、たとえば 100 年程度の比較的短いプレート境界では、本震の前後の活動も 20 年くらいしかないが、本震の発生間隔が、たとえば 2000 年というように長い活断層の場合では、本震前後の活動も前後 200 年くらいは続くことがあると思われる。

大地震の地震活動の 1 サイクルを考えて、現在がどの時点かを知ることが、地震の長期予測に関連して重要なことである。

群発地震 先が読めない地震活動

本震の後、本震の震源断層面の近くに、集中的に多くの小さい破壊(余震)が発生する。余震は一般的にしだいに少なくなっていく。本震の直後には、大小とりまぜてたくさんの余震が起こるので、本震で壊れかけた建物や斜面などが崩れるきっかけとなる場合も多く、震災を増大させる危険があるので、十分な注意を要する。

余震が続くという以外にも、地震が続発する事例はたくさんある。大地震が続発する例もある。プレート境界である南海トラフでは、東側の東海沖の巨大地震に続いて西の南海沖に巨大地震が起こる傾向がある。

最大クラスの地震がいくつもあって、とくに抜きん出て大きな地震が存在しないというような、一連の地震群を群発地震と呼ぶということは前章でも少しふれた。1965 年 8 月に始まった松代群発地震は、日本が近代的な観測技術を持つようになって最初の大規模な群発地震であった。1966 年 4 月には、地面の動きを 10 万倍に拡大して記録する高感度の地震計で、1 日に 6000 回を超える地震が記録された。

日本列島では、活断層をずらすような大地震は、前震一本震一余震というような活動パターンが多い。群発地震は、小規模の地震の群だけで終わってしまう場合もよくあるが、火山活動や活断層による大地震に先行して近くの地域で発生する場合がある。だから有感の群発地震があると、人びとはたいへん不安を感じることになる。しかし、観測網が完備していない地域では、地下でどのような現象が起こっているのかをしっかりと把握することは困難であり、それを予測するのはほとんど不可能である。

余震の減り方 100 年も続く余震活動

大地震が起こると、その直後からたくさんの余震が、本震の震源断層面の近くに発生し始めて、長期間にわたって続くことになる。揺り戻しという呼び方とともに、昔からよく知られている現象である。本震が大きいほど、余震は多く、また広い範囲に起こり、最大の余震の規模も大きい。余震の空間的分布は、本震の震源断層面がどのようにできたかを、本震の直後に知るのによく利用される。

余震の数は本震からの時間の経過とともに、しだいに減っていく。本震からの時間が経過するにしたがって減ることは減るのだが、たまに大きな余震があって、その大きな余震に、また「余震の余震」が続く。本震で大きく揺れた地域では、それだけ体に感じる余震も多く、人々の不安をさらに招いたり、建物がさらに崩壊するなど、さまざまな影響がある。

気象庁は本震の近くに発生したものを余震と発表するが、本震から離れた所でも、大地震の直後に中小規模の地震が増えることがあり、このような現象があると、それを「広い意味での余震」とか「広義の余震」という場合がある。余震と、広い意味での余震とが、とくに明瞭に区別されるわけではない。

とくに規模の大きな余震は、本震の震源断層面に隣接した所に、本震の直後に起こることが多いが、数年後に起こる場合もあり、また、内陸の活断層帯では数十年後に大きな余震が起こる場合もある。余震活動は 100 年続くといっても言い過ぎではない。M7 クラスの本震の後には、M6 クラスの余震があると考えて、とりあえず数年間は注意しておく方がよい。

大きな余震の予報 地震予報の実践

余震活動に関しては、事例も多く記録されており、統計的モデルもできているから、本震の直後からある程度の予報を出すことができる。地震予報の練習にもなる。

また、余震の中でも大きな余震を予報することもできる。大地震の後、たくさんの余震が続いているときに、その余震活動が目立って減ってきたなと思っていると、その次にはとくに大きな余震が起こるという事例がある。内陸の大地震を体験した人の中には、このような現象を経験的に知っている人が多い。観測データを統計学的に分析しても、かなり多くの場合にはっきりと見られる現象であり、この性質を利用すると、大きな余震の予報を出すことができる可能性がある。

ただし、このような予報を出すためには、本震の起こった地域に、強震計観測網が整備されていて、大地震のすぐ後に、どのような震源断層面ができたかがわかり、しかも小さい地震を精度よく観測する地震計ネットワークもあり、そのシステムが大地震でこわれることなく機能していなければならない。また、このシステムは、たくさんの地震が発生したときにも、リアルタイムでその震源情報をコンピュータに次つぎと蓄積するとともに、それまでの地震活動状況を分析した結果を画面に表示するソフトウェアと連動している必要がある。さらに何よりも、そのデータを見て、的確な判断をする専門家が、常時その地域を監視していることが不可欠である。このような人員を含むシステムを整備し、余震予報を出すことを、日本ではそろそろ考えてもいいのではないだろうか。

実験室での再現 高温高压下の岩石破壊

地震は、地下の岩盤の中に破壊面が発生することによって起こるのだから、それと同じような現象を、実験室の中で再現することができれば、地震についての理解が一段と進むことになるのだろうが、実現するためには、大規模な設備と、たくさんの人手が必要である。

実験の条件を、物理学的に地球の内部と同じ条件にするためには、制御できる高い温度と高い圧力の中に岩石を封じ込めて、それに自在に力を加えることが必要だが、さらに大切なことは、その封じ込めた岩石のいろいろな性質の変化を、時々刻々コンピュータに入れていくためのセンサーと測定システムがなければならないということである。高温で高压の容器に封じ込めた小さい岩石に、センサーをたくさん取りつけてコンピュータにつなぐ技術が何といってもたいへんである。

実験の初期の段階では、大がかりな実験装置でなくても、いろいろなことがわかった。たとえば、マツヤニのブロックに力を加えて破壊を発生させることができるが、純度の高いマツヤニだと本震に続いて余震が起こるときと同じような割れ目が発生し、混じり物がたくさん入っていて不均質のブロックだと群発地震のときのような割れ目が発生するというようなちがいが見られた。

大がかりなシステムでは、数百トンの力を加え、温度を数百度(摂氏)まで上げて実験をおこなうが、実験できる岩石サンプルも数センチまで大きくできるようになった。大きな破壊(本震)の発生の前には、本震の破壊の開始点近くで小さい破壊が増えたりするような前兆現象なども、このような実験から見つかっている。

地震の引き金 未解決の問題

大きな地震が、隣接する他の地域の地震を起こすきっかけになることがある。たとえば、もぐり込んだプレートの先の方で深い大きな地震が起こると、プレートのもぐり込み運動がそれだけ進んで、もぐり込み口を下へ引っ張る力が増えることになる。そうすると、プレートのもぐり込み口では、プレート境界地震が起こりやすい状態になる。実際に 1933 年 3 月 3 日に起こった三陸沖地震(M8.1)の 2~3 年前に、日本海の深さ 350km あたりに M7 クラスの深い地震が起きた例が知られている。

また、遠方から伝わってきた大きな振幅の地震波によって、岩盤がひずみ、小さい地震を引き起こすことがある。高感度地震計の記録を見てみると、遠地地震の長周期の地震波記録が数時間も続いている中に、観測点近くの微小地震の群が見られることがよくある。

地震発生の引き金になると考えられる現象には、いろいろな種類のものがある。地下水の水圧変化

や活断層帯の河川の急激な増水なども地震発生の引き金になる場合がある。深井戸に水を圧入したり、水深の深いダムに水をためたりした後、その地域に浅い地震が起こった事例がたくさん知られている。

今にも地震が起こるといような、岩盤にストレスがたまって臨界状態になっている場合に、地震を起こす力を増加させる現象や、その岩盤の強度を弱める現象があると、それらが引き金となって地震が起こる。本来、大地震が起こる可能性があって、しばらく大地震が起こっていないような地域では、深い貯水池を作る計画などは慎重にした方がいい。

江戸の地震

日本の首都は、地震国を象徴するように、よく大揺れになる。4つのプレートが集まってくる関東周辺地域では、大地震だけでなく大噴火も起こる。

江戸と周辺の大地震の記録は、1615年の大地震あたりから抜け落ちのない資料があると思われる。1703年の地震はM8クラスの巨大地震で、房総半島南端の野島はこのとき6mの隆起で陸続きになった。続いて1707年には南海トラフの巨大地震と富士山の噴火があった。1782年の大地震(M7)の翌年には浅間山の大噴火があり、そのために天明の飢饉をもたらす冷夏となった。

これらの歴史資料が教えるように、関東周辺地域でもプレート運動による大地のひずみは確実に蓄積されていて、次の大地震が近いといえる。

Chapter 3 地震の大きさ

地震が震災を起こす 大震災の多い東アジア

地震という現象は、人類が地球に出現したときよりも、はるか昔から発生していた地球上の自然現象である。一方、震災は、人が住んでいてはじめて発生する社会現象である。

プレート境界に近い変動帯の地域では、活断層運動による上下のずれが生み出した盆地や平野に大都市が発達する。だから、大都市は必然的に大地震が起こる場所にある場合が多い。地震学という理学の分野では、自然現象の地震のしくみを考えているが、地震工学では、震災と地震の両面から研究を進めていく。いずれにしても震災の軽減に貢献するのが、研究を進める大きな目的の一つとなる。

震災の規模を死者数で表すことにして、地震のマグニチュード(M)と震災の大きさの関係を調べると、地域的な特徴が明らかに浮かび上がってくる。一般的にマグニチュードが大きいと死者数も多くなる傾向があるが、陸地に震源断層面があった場合、日本では M6 以上にならないと死者は出ないのに対して、中国などでは M5 程度の地震でもかなり多くの死者が出ることがわかる。一方、M7 程度の大地震が内陸部に起こると、日本でも中国でも同じように多くの死者を出していることがわかる。近代化された都市であっても、大揺れによる震災の規模は、この 100 年の歴史を見ても、あまり小さくなっていない。

20 世紀の世界の震災を死者・不明者数の順に並べると、1 位は 1976 年の中国唐山地震(M7.8)で 24 万人、2 位は 1920 年の中国海原地震(M8.6)で 20 万人、3 位が 1923 年の関東地震(M7.9)の 14 万人で、いずれも東アジア地域で発生した。

マグニチュード 地震の大きさを測る

さて、これからしばらく地震の大きさのことを考えてみたい。地震の大きさは普通マグニチュードという値で表されている。マグニチュードはどうやって測るのだろうか。マグニチュードは震源断層面から出た地震波全体の大きさを表す量であり、M という文字を使って表している。

マグニチュードというもののさしは、1930 年代にアメリカの地震学者リヒターが考案したので、米国の新聞などには、よくリヒター・スケールと書いてある。このもののさしは、震央から 100km の所にある、倍率 2800 倍の地震計のデータをもとにするものだった。その記録の最大振幅の 10 倍ごとに 1.0 増えるという常用対数のもののさしを作った。その後、いろいろな地震計の記録を使えるように、多くの人たちが M を決める方法を工夫してきたが、決める方法によっては、±0.5 くらい M の値がちがうこともときどきある。

M というもののさしは、地震計記録の振幅の対数だから、振幅が小さくなれば、0.0 にもなるし、もちろんマイナスの値にもなる。たとえば、M-1.4 とか M-2.5 というような小さい地震も、高感度の地震計で観測される。このように M の値の範囲はたいへん広い。

日本の地震のマグニチュードを決めて発表するのは気象庁の役目である。気象庁は、最新の観測ネットワークの状況に合わせてマグニチュードを算出する方式を見直すことを、2001 年に決定した。データの一貫性を保つように 1994 年以降のデータをすべて見直すことになり、その作業を進めている。とりあえず、最近の主な地震に関して、右ページの表のように変更されることになった。

古地震の大きさ 古文書から決める地震データ

古地震の起こった日時、場所、大きさを決めてデータ化するのには、古文書に記された表現を解釈しながら、数値化することになる。時刻は換算しながら、今の暦法と時制に合わせる。場所と大きさは、被害や揺れの強さの地理的な分布をもとに推定する。被害の内容を、今の震度階級にあてはめて数値化し、その震度の地理的分布の中心に震源を推定する。最大震度の大きさと震度分布の広がり方から、マグニチュードを推定することになる。震度とは地震動による揺れの大きさを表すもののさしだが、人の暮らし方の条件が同じでないので、今の震度階級のもののさしにあてはめるのに苦労が多い。

震災には、いろいろな種類がある。日本では、家屋の火災、津波による被害、山崩れ、液状化現象

などが多い。木造の家屋が多いために、日本では火災の発生の状況で、震災の広がりが大きく左右される。津波がどの地域にどのような大きさで来たかというデータからは、震源域での海底面の動きを計算で求めることもできる。

山崩れや噴砂現象などは、地震動を受けた土地の地質や地形などの条件によって影響を受ける。山崩れが谷川をせき止め、水がたまった後、しばらくして決壊したために、下流に大水害が発生するというような災害の起こった場合もある。

古地震の大きさや場所を決めるためには、近代に起きた地震と上に述べたような震災の調査結果をもとにしながら、多くの古文書の調査結果とつき合わせて、その精度を上げていく。いずれにしても、日本には長期間にわたる豊富な歴史の記録があるおかげで詳しい地震活動の資料が得られ、研究に利用できるようになっている。

地震モーメントとは 巨大な地震の大きさを測る

マグニチュード(M)の値を決めるときや、データ集を見るとき注意しなければならないのは、M8を超えるような巨大地震の場合である。震源の近くでは揺れが大きすぎて地震計の機能の限界を超えてしまい、記録が使えない。巨大地震は長い震源断層面を数百秒もかけて破壊が伝わって起こる。このため、たいへんゆっくりとした動きの地震波を発生するという特徴があるが、その波はかならずしもそれほど大きな振幅にはならない。したがって、巨大な地震であるのに M8 程度でマグニチュードの値が頭打ちになってしまって、それよりも大きな M の値が決められないという問題点があった。

そこで、この点を改善するために、モーメントマグニチュード(Mw)という値を使うことが提案された。まず、地震モーメント(Mo)を決める。地震モーメントとは震源断層面のずれの総量で決まる量であり、どんな巨大地震でも値が頭打ちになってしまうようなことがない。したがって、この地震モーメントの対数を用いてモーメントマグニチュード(Mw)を決めようという考えである。

従来の地震計記録の振幅だけから求めるマグニチュードは、M8.0 程度までしか測れないが、モーメントマグニチュード(Mw)はもっと巨大な地震の場合にも有効である。しかし、近代的な地震計のなかった時代の古い巨大地震に関しては、長周期の地震波の形を分析するための地震計記録は存在せず、地震モーメントを計算することはできないので、このようなモーメントマグニチュードのデータが得られるのは、性能のいい地震計が設置されて観測されるようになった 20 世紀以降の大地震についてである。

モーメントマグニチュード 9.5 世界最大の地震

それでは、地震の大きさを実感するために、20 世紀の大地震で、地震計でマグニチュードが測られた実例を見ることにしよう。

1960 年 5 月のチリ地震は観測史上最大の地震で、Mw9.5 であった。昔ながらの地震計記録から決めた大きさは M8.5 だったから、従来の方法で決めたマグニチュードは、頭打ちだったことがわかる。このチリ地震は南米のチリの沖で起こり、海底が広く変動したために大津波を起こした。発生した津波は、ほぼ 22 時間かかって日本の太平洋岸に到着し、日本でもこの津波で 142 人の死者を出した。

チリ地震では、地震の後何日もの間、地球全体が揺れ続けたことが観測記録から知られている。このような現象を地球の自由振動という。第 4 章で詳しく説明するが、地球の内部構造から理論的に計算され固有周期と、このとき観測された自由振動の周期がくらべられて、地球の構造の研究が進んだ。モーメントマグニチュードの大きな地震は他に、1964 年アラスカ地震の Mw9.2、1957 年アリューシャン地震の Mw9.1 などがある。最大振幅から決めたマグニチュードは、それぞれ M8.3 と M8.1 で頭打ちになっている。

日本の内陸地震では、1891 年の濃尾地震は破壊面の成長が非常に大きくなり、M8.0 に達した。そのため強震動が広い地域に起こり、約 7000 人の死者・不明者を出した。1923 年の関東地震は M7.9 とされているが、地震後起こった広域の火災のために焼死者を大量に出し、約 14 万人の死者および行方不明者となった。これらの巨大地震は地震波の適当な記録がないので、まだモーメントマグニチュードが推定できていない。

地震波のエネルギー 地震は地球エネルギーの消費

地震は、岩盤の中にたくわえられているひずみエネルギーを消費して起こる自然現象である。地震が起こると、このエネルギーの一部が地震波エネルギーとなって放出され、あとの一部のエネルギーは断層運動のときの摩擦熱などになって消費される。断層運動の発生で消費されるエネルギー、つまり地震現象全体で消費されるひずみエネルギーにくらべて、地震波エネルギーがどれだけの割合で岩盤の中に放射されたかという量を、地震の効率と呼ぶ。

震源断層面での応力降下量(ストレスドロップ、56 ページ)が大きいほど、あるいは断層のずれの総量で決まる地震モーメント(M_0 、80 ページ)が大きいほど、地震波エネルギーは大きくなる。

地震波エネルギーとマグニチュードの関係は、たとえば $M5$ の地震波エネルギーでは強力な爆薬であるトリニトロトルエン(TNT)火薬の 2 万トン分にあたり、 $M6$ の地震波エネルギーは 1 メガトンの水爆にあたるといわれる。また、 M が 1.0 大きくなると地震波エネルギーは約 30 倍大きくなるといわれている。これだと、 $M8.0$ の地震の地震波エネルギーは、 $M6.0$ の地震の地震波エネルギーの 1000 倍、 $M4.0$ の地震波エネルギーの 100 万倍ということになる。

このような関係は、たとえば、地震の制御を考えるような場合に重要になる。地震の制御とは、 $M8.0$ の地震を止めることはできないが、 $M8.0$ の大地震の代わりに、小さい地震をたくさん起こして被害を軽減させようという課題である。この場合、 $M4.0$ の地震を 100 万個も起こす必要がある上に、うっかり失敗して大きい地震を誘発しないように気をつけないといけない。

小さい地震ほど多い グーテンベルグ・リヒターの式

一般に自然現象では、大規模な現象は頻度が低く、小さい規模の現象は頻繁に起こるという性質がある。日本に住むわたしたちは数年の間にでも、かなり多くの地震を体験するので、このような地震の規模と頻度の関係を、経験的に感じていると思う。それでは、大きい地震と小さい地震の頻度には、どのような法則があてはまるかを、実際に見ることにしよう。

地震の大きさはマグニチュード(M)で表される。 M の値とその M を持つ地震の数の対数を求めて、それらの関係を示すグラフを描いてみると、点が直線上に乗ることがわかる。その直線で表される関係式を、この性質を発見した 2 人の地震学者の名をとって、グーテンベルグ・リヒターの式と呼んでいる。

このグラフの上での直線の傾きは地域によって少しずつちがうが、傾きが 1.0 の場合を例にあげて規模の大小の地震の数をくらべると、ある地域で、 $M8$ の地震が 100 年に 1 回起こるとすると、同じ地域、同じ期間に $M7$ の地震は 10 個、 $M6$ の地震は 100 個起こることになる。ほぼ抜かりなく記録することのできる地震の大きさを $M4$ として、 $M4$ の地震は 100 年で 10,000 個、すなわち 1 年に 100 回は起こるということになる、逆に $M4$ の地震がほぼ 3 日に 1 回起こるような地域では、100 年に 1 回くらいは $M8$ の巨大地震が起こるという割合になる。

ただし、このような統計的な性質は、十分に広い地域で十分長い期間のデータを記録したときに成り立つものである。短期間に小さい地震が増えたからといって、その場所にすぐ大地震が起こる、というように性質が変化するのではないことに注意しよう。

加速度・速度・変位の大きさ 地震計の特性が重要

地震計は、普通は地上に置いてあって、その置いた地点の動きをセンサーで検知し、電気信号に変換してコンピュータなどに地面の動きを収録するシステムである。つまり地震計は、それ自体が置いてある地点の動きを測るので、その地点と地震計は揺れている間も一緒に動いているのだから、地上の動き方の詳細を記録するためには、たいへん複雑な工夫をして使うことになる。

電子回路やコンピュータによる計算技術が使えなかった 20 世紀前半の地震計は、もっぱら振り子やバネやテコなどの機械じかけの工夫で設計された。それぞれの工夫の結果、置いた場所の変位(動いた距離)を記録する変位地震計、地面の動く速度の大きさを記録する速度地震計、速度の時間的变化の

割合である加速度を記録する加速度計などが開発され、それぞれ目的に応じて使い分けられてきた。最近では、計算処理の技術とともに計測システムを総合的に設計するから、加速度計とか速度計という呼び名は適当でない。

このようなわけで、地震計の記録を見るときには、その記録がどのような方式の機械で得られたかを、しっかりと調べてから見ないと、それがどのような運動を表しているかわからないということになる。計測システムの特性を入力して、コンピュータで好みの動きに換算してから画面で見ると、地面の動きが感覚的に把握できる。

「揺れが大きい」とか「大きな動き」と言っても、どのような物理量(変位、速度、加速度など)の大きさを指しているかが大切で、たとえば活断層が動くとき大きな変位のずれを示し、加速度が大きいと物が飛ぶこともある。

マグニチュードと震度の関係 震源断層面の大きさと揺れ

天井に 20W の蛍光灯が 1 本点灯しているときの机の上の明るさと、40W の蛍光灯が 1 本点灯しているときの、同じ机の上の明るさをくらべると、後者の方が明るい。しかも、40W の蛍光灯は、20W の蛍光灯の 2 倍の長さがあるので、明るく照らされる範囲も長くて広がるはずである。

このような、蛍光灯のワット数(右図のように蛍光灯の長さに比例している)が地震のマグニチュード(M)に相当し、机の上の明るさが、地震による揺れの大きさ、つまり震度に相当する。また、蛍光灯が同じでも、机が遠くなるほど、机の上は暗くなる。それは地震の場合、同じ M でも、震源から遠い所ほど揺れは一般に小さくなり、震度の値が小さくなることに対応する。

地震は、岩盤の中に破壊面ができて発生する。マグニチュードの大きい地震ほど、震源域での破壊面が大きくなっている。つまり、蛍光灯でいうとワット数が大きいこと、すなわち蛍光灯の長さが長くなっているか、2 本、3 本と並んで光源の面積が広がっていることに相当する。

たとえば、1995 年兵庫県南部地震は M7.3 で、震源断層面は淡路島北部から神戸市の地下にかけて、地中にまっすぐ切り込んだような、深さ方向に約 15km、水平方向に約 50km の長さの面状になった(49 ページ)。震源断層面のすぐ上の地表では、震度 7 の大揺れの地域が細長くのびていた。その細長い帯から、つまり震源断層面から遠く離れるにしたがって、震度 6、震度 5、震度 4 と、揺れが小さくなった。そのとき宇治市にいたわたしは、震度 5 の揺れを体験した。

気象庁震度階級 大地震のたびに変わる震度階級

震度を表す方法や震度階級は、時代とともにたびたび変わってきた。また、国によって震度の表し方は大きく異なっている。だから揺れの大きさをくらべるときには、そのとき、その場所で、どんな震度のものさしを使っていたかを、よく調べてからくらべないといけない。

気象庁の震度階級は、1995 年兵庫県南部地震のすぐ後で改定された。この震度階級は、気象庁が定めた規格による震度計と呼ばれる測定器で測定された、小数点以下 1 桁の数字で表される計測震度をもとに定義されたものであり、0 から 4 までと、5 弱、5 強、6 弱、6 強、7 の 10 段階で表されるようになっている。

1995 年兵庫県南部地震のときには、1948 年の福井地震の直後に改定された、0 から 7 までの 8 段階の震度階級が使われていた。福井地震までは 0 から 6 の 7 段階で、福井地震の被害があまりにもひどかったために、翌年震度 7 が加えられたが、その後 1995 年まで使われることはなかった。したがって、気象庁の旧震度階級の震度 7 という値は、1995 年兵庫県南部地震のときに 1 回だけ発表されて終わりとなった。そのときの震度 7 の定義には、「家屋の倒壊が 30%以上におよび…」というような被害のデータが使われていたために、家屋の被害の調査結果が出るのを待って、ようやく震度 7 の地域が発表されるという問題点が残った。この点は、震度計による計測震度で測るようになり、測定システムから自動的に値が出力されるため、速報ができるようになったことで解消できるだろう。これによって救出活動が早期に立ち上げられる効果が期待される。

鯰と鹿島大明神

鯰と地震の関係は「瓢箪鯰」ということばがもとだと分析した例が多い。ぬるぬるしたものを丸いもので押さえる困難を指す瓢箪鯰ということばは、不安定なものを意味するが、その代表として地震が思い浮かべられたのだらうという。

1855(安政 2)年の江戸の大地震が起こったのはちょうど神無月で、鹿島大明神が出雲に出向いているときにあたっていたのかもしれない。

この安政の江戸地震のことを書いた「安政見聞誌」に、うなぎを捕りに出かけた篠崎某が、うなぎではなく鯰を得て、言い伝えを思い出して異変に備えたという逸話が出ている。大正の関東地震の前日にも、向島で鯰がはねたり、鵜沼でバケツに 3 ばいもの鯰がとれたという話が伝わっている。

Chapter 4 地震波の伝わり方

地球の中を通過した地震波 英字新聞が伝えた情報

19世紀の後半、ドイツでは水平振り子式の装置を使って地球潮汐の測定がおこなわれていた。地球潮汐とは、海洋の潮の干満が起こるのと同じように、月や太陽の引力で固体地球が変形することをいい、それを地表の傾きの変化から調べようとしていたのである。

そのための水平振り子による観測がドイツ国内の2ヶ所でおこなわれていたが、1889年4月17日の夕方ごろ、その装置で異常な振動が記録された。研究者たちはその振動の原因がわからないままに、ああでもない、こうでもない懸念に調べていた。

このころ、明治22年の日本では、すでに英語の新聞が発行されていて、世界にニュースが発信されていた。この、日本から来た英語の新聞がドイツの研究者たちの所へも届いた。そこには東京の地震計が日本の近くで起こった地震を記録したという記事があり、そのおかげで、ドイツの水平振り子の揺れの記録が日本付近の地震から地球の中を伝わって、ドイツまでやってきた地震波であることがわかったのである。

この大発見をきっかけにして、科学者たちは、振り子で地震の波を記録するための地震計を工夫し、記録をとることにより、地球の中の構造がわかるのではないかと考えた。そして、地震のない国の多いヨーロッパでは、物理学者たちが地震計を開発して地球内部の構造を調べるという現在の地震学の大きな課題の一つとなった分野を発展させることになった。中でも、ドイツのゲッチンゲン大学教授のウィーヘルトが作った地震計が、地球の構造の研究に大いに活躍することになった。

地球を伝わる地震波 P波・S波・表面波

ゴムのように、力を加えると変形し、力を抜くと元に戻る性質を持つ物を弾性体という。弾性体には弾性波という波が伝わる性質がある。弾性体の内部を伝わる波には、P波とS波とがあり、また、弾性体の表面に沿って表面波が伝わる。地球の性質は弾性体であるといえる。地震が発生すると、地球の中をP波とS波が伝わり、それらが地球の表面に達すると、さらに表面波を呼び起こして、それも地球の表層に沿って伝わっていく。

P波は、押したり引いたりする動きが伝わる波で、ある点の振動の向きが、波の伝わっていく方向と同じであり、S波は、ある点での振動の向きが、波の伝わる方向に直角である。そのことから、それぞれ縦波、横波と呼ばれる。同じ弾性体を伝わる速さは、P波のほうがS波より速い。表面波はS波よりも少し遅く伝わる。

地震計の記録に描かれた地震動は、その地点に次つぎと到着する地震波による揺れを表している。したがって、もっとも単純な場合、記録の最初はP波で始まり、途中にS波があり、その少し後に表面波が記録されることになる。

また、P波とS波の振幅をくらべると、P波の方が大きい場合も、S波の方が大きい場合もある。後者の場合が見てわかりやすいので、教科書にはS波が大きい記録例が使われる。P波とS波の伝わる速さがちがうから、震源から遠くなるほどP波とS波の到着時刻は離れる。それを利用し、P波が到着してからS波が到着するまでの時間を秒単位で計って8倍すると、震源までの距離(km)が求まる。たとえば、P波からS波まで10秒だったら、震源まで約80kmである。

地球の全体像 地震波の反射、屈折、回折

地球の中のさまざまな境界面や地表で、反射したり屈折したりした地震波が、地表に次つぎとやってくるから、ほとんどの場合にはそれらが重なって、地震波の記録はかなり複雑になっている。それを読みとっていろいろなことがわかる。地震波が地球の中を伝わると、速度の急変する境界面では、光と同じように地震波が屈折したり反射したりする。その性質が地球の内部構造を知るために役立つ。

震源を出てから観測点に着くまでの地震波の到達時間を走時という。震源の真上の地表面の点を震央という。走時を縦軸に、震央から観測点までの距離を横軸にとって描いたグラフを走時曲線と呼ぶ。

この曲線が折れ曲がっているということは、伝わってくる道筋に速度が急変する所があることを示している。この走時曲線から地球内部の構造が次つぎと明らかになってきた。

地球は球に近い形をしているが、内部は何層かの殻のような構造になっている。地球の大気層の厚さはほぼ 100km、固体地球の表面を覆うリソスフェアの厚さが約 100km、リソスフェアを含む岩圏は 2900km、そして中心核の半径は 3500km である。これらの領域を体積でくらべると、大気圏と水圏が 5%、岩圏が 80%、中心核が 15%程度となり、岩圏は地球の大部分を占めていることがわかる。

走時曲線の解析からわかった地球内部の構造を見てみよう。まず、地殻とマントルの境界をモホロビッチ不連続面(モホ面)と呼ぶが、この面は、1909 年にユーゴスラビアの地震学者モホロビッチによって発見された。モホ面のすぐ上では、P 波は秒速 7km 程度で伝わり、モホ面のすぐ下では秒速 8km 以上の速さで伝わる。

変動帯の地殻構造 浅い地震は上部地殻に

1923 年には、さらに地殻の中にも地震波速度の不連続面が見つかった。オーストリアのコンラドがその発見者で、この不連続面はコンラド面と呼ばれている。このようにして世界各地の地殻が調べられた結果、大陸の地殻についての知識がたくわえられ、大陸の地殻は、高い山地のある部分では厚くなっていて、低地で薄いということがわかった。そこで、氷が水に浮かぶように、地殻がマントルに氷山のように浮かんでいるというしくみが考えられた。これは、地殻にかかる重力と浮力が釣り合っているためであると考えられ、この考えは、地殻均衡(アイソスタシー)説と呼ばれている。

海洋の地殻の研究は陸にくらべて遅れたが、海での観測ができるようになって海洋地殻の研究も進み、海洋地殻は陸にくらべて薄く、陸の地殻のコンラド面から上の層(花崗岩質層という)にあたる層をまったく含んでいないためであることがわかってきた。

地下構造を調べるためには、走時曲線を描きやすいように、目的の場所に地震計を直線上に並べて、地震波を記録するのが理想的である。しかし、そのような観測線で地震が起こるのをじっと待つというよりも、地震を人工的に起こすことが工夫されるようになって、地殻構造がよくわかり、地震の起こり方との関係もわかってきた。

日本列島の陸地の浅い地震は、深さ 3km~15km に多く起こっている。地殻の上部のこの層を花崗岩質層といい、また地震発生層とも呼んでいる。さらに詳しく見ると、小さい地震の震源は地震発生層の下部に圧倒的に多く、大きい地震も同じように地震発生層の底から始まり、震源断層面が、ときには地表に達する。

地球の中を見る目 マントルから核へ

地球の中は、もちろん誰も見ることはできないので、どんな色をしているのかわからない。温度も密度もどんな物質なのかということも、なかなかわからない。地球の中のことで、今までにいちばんよくわかっているのは、地震波が伝わる速度がどのように分布するかという構造である。P 波と S 波と表面波が、それぞれどこをどのくらいの速さで伝わるかということがわかる。

地殻の下よりもさらに深い構造を見ると、P 波の速度は、マントル上部で秒速 8km くらいで、上部マントルには、深さとともに速度が増えるという傾向がある。しかし、深さ 100km~200km あたりには、その上よりも速度の少し遅い層があることがわかっていて、この部分を低速度層と呼んでいる。この低速度層あたりでは、岩石が一部溶けて液体になっているために、地震波の速度がその上の層よりも遅くなっているのであろうと考えられている。岩が溶けて、液体の性質が強くなると、とくに S 波が遅くなり、まったくの液体になると S 波は伝わらなくなる。

また、660km ほどの深さで、深さとともに急に速度が速くなる境界があることも知られている。地震は、この 660km の境界よりも上の部分で起こっており、それよりも深い地震は起こらない。

マントルの最下部と外核の間で、地震波の伝わり方は大きく変わる。層構造の中で、とりわけ目立つ境界が、このマントルと外核の境で、地表からの深さ 2900km あたりにある。マントルは固体であり、P 波と S 波が伝わるが、外核は鉄の液体であるために、この中を S 波は伝わらない。また、P 波も速度がいちじるしく遅くなる。

地球の CT スキャン 地球の X 線写真を撮る

地球はゴムのボールのように弾性体の球だから、固有周期で振動するという性質がある。大地震が起こると、しばらくその振幅が大きくなって続く。この現象を地球の自由振動、あるいは地球振動という。この記録を分析して地球の内部構造を詳しく調べることも地震学の重要な仕事の一つである。

また、中の見えない物体に X 線を四方八方から透過させて記録し、コンピュータでその記録を計算処理して、物体の構造を輪切りにして見せたり、見かけ上透明にして 3 次元で見せたりする技術をコンピュータ・トモグラフィー(CT)という。病院で人間の脳や内臓を輪切りにして見る方法も同じで、CT スキャンという呼び名で知られている。

体の中を見るのと同じ原理で地球の中を見ることができ、それを地球トモグラフィーと呼ぶ、この場合、X 線の代わりに地震波を使って計算する。世界のあちこちで起きた地震による地震波は、世界のあちこちの地震計で記録され、データとして蓄積されているので、それを使って計算するわけである。これらの P 波と S 波の走時を記録したデータを、大量にコンピュータに入力して計算処理すると、地球内部の構造の断面図を描くことができる。

この地球トモグラフィーの方法によると、今までは同じ深さで同じ速度と仮定してきた、地球内部の地震波速度構造を、3 次元的に見るようになる。たとえば、日本列島の下にもぐり込む太平洋プレートの先は、660km の深さまでもぐり込んで、その先はどこへ行くのかというようなことを知ることができるようになる。

異常にのびる震度分布 もぐったプレートを通る地震波

ほとんどの浅い地震の場合、震央距離が大きくなるほど震度は小さくなる。しかも、震度の等しい地点を結ぶ線を引くと、同心円状になっている。ところが、異常振域といって、震央からの距離が遠いほど震度が大きいという奇妙な現象が起こることがある。たとえば、1973 年、日本海の西、ロシアの東海岸の地下 575km に深発地震が起こったとき、東北の太平洋側では震度 2~3、日本海側で震度 1~2 の揺れがあった。この地震は、もぐり込んだ太平洋プレートの中に起こった地震で、そこから、もぐり込む太平洋プレートに沿って伝わってきた地震波が、おもに太平洋岸に効率よく到達したのであろうと考えられる。

異常震域の例は、震源が深く M7 以上の大きな地震が起こると、よく観測されるが、比較的浅い地震でも、プレートが複雑にもぐり込んでいる日本列島ではときどき観測されることがある。古文書の実験から震源の位置を推定するときなどにも、この異常震域の発生のことをよく心得ておかないといけない。

異常震域の発生する原因を、こまかく分析していくと、日本列島の下地震波の伝わる効率の分布がわかってくる。もぐり込んだ海のプレートの岩盤は、地震波の減衰が小さく、逆に、もぐり込んだプレートのすぐ上にある大陸直下の岩体は地震波の減衰が大きく、コンピュータで数値計算をしてみると、異常震域の発生を再現することができる。こまかく見ると陸側プレートの下層では減衰が大きく、かつ地震波の速度が遅く、逆に海洋プレートの中では減衰が小さくて、かつ地震波の速度が速いという構造になっている。

高温高压実験でわかること 実験室で再現する地球の内部

マントル上部の、地表からの深さ 400km と 660km 付近には、地震波をよく反射する境界がある。それらの深さを境にして、P 波の伝わる速度の増え方が変わっている。これを境に速度が急に速くなることは前にも述べた。深さ 400km より上を上部マントル、400~660km をマントル遷移層と呼び、その下、2900km の核との境界までを下部マントルという。

このような、マントルの構造を作りだしている物質はいったい何であるのか、またその物質が物理化学的にどのような状態にあるのかを知るために、地球内部の高温と高压の状態を、実験室で再現することが試みられている。

マントルを構成する主な鉱物は、カンラン石と呼ばれる鉱物であると考えられている。深さ 400km に相当する温度と圧力を、大型の実験装置に封じ込めたカンラン石に加えて、地球内部の状態を再現し、鉱物の性質が変化する様子を調べることができる。

実験は、さまざまな研究の目的に応じておこなわれるが、たとえば、元素組成が上部マントルと下部マントルで同じかどうかを知ることなどを目的とした実験がおこなわれている。

マントルの中には対流が起こっていることが知られているが、その物質の流れが、上部マントルと下部マントルの間を行き来しているならば、構成物質の組成は上部と下部とで同じ構造になっているはずである。逆にもし構成物質の組成が変わっているならば、マントル対流はこの境を突き抜けることなく、上部と下部で二層の対流となっていることになる。

スーパープリューム 地球深部の対流

下部マントルは、固体地球の体積の約 70%を占める大きな部分であり、地球の固体としての性質を支配する重要な部分である。この中では、地震波の伝わる速度や構成物質の密度などの値は、深さ方向にも、水平方向にも、変化の割合が小さい。つまり、ほぼ様な構造であると考えられる。また、地震が起こったことも観測されていない。

しかし、精度の高い測定と注意深い解析によって、下部マントルにも、地域的に地震波速度が異なっている部分があることが明らかになりつつある。これは、温度の高い所と低い所があることを示していると思われる。このことは、下部マントルに上昇する流れと下降する流れがあって、下部マントルをまき込む対流運動が、マントル全体に起こっている可能性を示している。

マントル物質が上昇運動している所の流れをスーパープリュームと呼び、南太平洋スーパープリュームとアフリカ・スーパープリュームの存在が指摘されている。

さらにマントルの最下部、つまり核のすぐ外側には、たいへん複雑な構造があることが、しだいに明らかになってきた。その構造を説明するためのしくみがいろいろ考えられている。マントルの上部から、A 層、B 層、C 層、D 層と順に名がつけられているが、マントルの最も深いところにある複雑な構造の部分は、とくに D''層と呼ばれ、精度の高い大量のデータが蓄積されるようになって詳しく調べられ、大陸と海洋の場所や、海嶺や海溝の場所など、地球表層のプレートの位置や動きにも関係していると考えられるようになった。

人工震源を利用する探査 資源探査への貢献

地下資源の探査に地震計を使うようになったきっかけは、アメリカで岩塩ドームの油田の発見に成功したことであった。これは 1923 年のことで、その後、1930 年ごろにはあちこちの油田の開発に成功するようになり、そのころ、比較的深い構造を調べることのできる新しい地下探査の方法(反射法)の開発にも成功して、オクラホマの油田が発見された。

地下構造を調べるのに、地震波を記録して走時曲線を使うことはすでに述べたが、自然の地震から調べようとしたら、適当な地震が起こるまで待っていなければならない。また、もともと起こらない地域も多いので、地下構造を研究するためには人工地震に頼るほうが便利である。しかし、ダイナマイトを使うのには限界があり、なかなか大規模な人工地震は起こせない。1947 年には、第二次世界大戦が終わった後の仕事として、ドイツが作ったヘリゴランド島の要塞を破壊するための大爆破が計画され、そのときに合わせて地殻構造を調べる共同観測がおこなわれた。人工地震による地下構造の研究は、その後、地震観測技術が進んで、比較的少ない火薬量でも観測ができるようになった。

このようにして人工地震の研究分野は、地下資源の探査のために発展した。技術が進むにしたがって、だんだん深い所まで人工地震で調べられるようになったが、それでも 100km 程度の深さが限界である。また、山地や深海や南極、北極の極地などの構造を知るためには、たいへんな費用と人手が必要である。一方、地下深部を掘削して調べる技術は、地下が高温であるために進歩が遅い。

強震動の発生 地震工学という分野

1932(昭和 7)年、アメリカ合衆国の土木学会は、当時東京大学地震研究所の所長であった、末広恭二(すえひろきょうじ)を招いて講演をたのんだ。末広の講演題目は「地震工学」(Engineering Seismology)であり、このとき「地震工学」という用語が生まれた。その後、この用語が世界中で使われることになった。

この講演で末広が提案したのは、耐震設計のために、加速度計によって強震動の記録をとって、それをデータとして使うという考えであり、アメリカはこの考えをすぐとり入れて、翌年には早くも記録をとることに成功していた。

日本での強震計(強震動を記録する現在の地震計)の設置は遅れた。本格的な強震計の全国配備が始まったのは、1995 年阪神・淡路大震災の後であり、この大地震の記録も十分には残せなかったのが残念でしかたがない。一方、1999 年に大地震が内陸の逆断層運動で発生した台湾では、大地震発生の前に、すでに強震計の観測網が整備されていて、たくさんの質の良い強震動記録が得られた。それによって、活断層の位置と震源断層の動き、地表での強震動の状態、構造物の被害との関係などが詳しく分析できることになった。

強震動の発生のしくみは、震源断層面上の破壊の発生のしかた、そこから地表のある地点までの地震波の伝わる道すじの構造、地表での地盤の特性などに支配される。また、地表の人工構造物の揺れに対する応答特性も関係する。震災を防ぐためには、これらの研究成果を総合して活かすことが重要となる。今後の地震工学の分野が、世界の震災の軽減のためにますます重要になる。

都市の強震動を予測する

大阪府や大阪市では、震災軽減策のために各地点での強震動予測をおこなって、それをもとにした対策を検討した。

大阪市にもっとも大きな影響を与えるのは、なんといっても市の直下にある上町断層が動いた場合である。震度 7 になる地域が大阪市の中心部を大きく占める。南の方にある中央構造線が動くと、大阪府の南部には影響があるが、大阪府の出した報告書の図には、隣接する和歌山県の揺れは描いてない。本当はこの場合、和歌山県の側に震度 7 の地域がかなり広くあることになると思うが、そのことはどこにも出てこないで、危険性が目立たなくなってしまう。同じようなことが他の地域にもある。防災対策を進めるための情報の交換と共有が必要であろう。

Chapter 5 地震現象を測定する

地震波を記録する 地震計の歴史

地震の揺れを精度よく知るためには、まず地面に固定した振り子の動きを、地面との相対的な動きとしてとらえて記録する。そして、振り子の動きの理論から地面の動きを計算して求める。地面の動きは、3 次元的に把握しなければならないので、二つの水平振り子で東西と南北の動きをそれぞれ測り、鉛直振り子で上下の動きを測る。それら 3 台を一組のセンサーとして、地面の動きを記録して合成すると、到達した地震波の様子が 3 次元的にとらえられる。

振り子の固有周期が短いと、短周期の動きをとらえるのが得意な地震計となり、近くの小さい地震を観測するための地震計として使われる短周期地震計ができる。固有周期が長い振り子を使うと遠地地震の観測を得意とする長周期地震計ができる。

一方、1960 年のチリ地震のとき、地球の自由振動(106 ページ)を、はじめて明瞭に記録したのは、アメリカの地震学者ベニオフがカリフォルニア州のイザベラに置いた、ひずみ地震計であった。この地震計は、2 点間の長さの変化を測る方式で、振り子式にくらべて長い周期から短い周期まで非常に広い範囲の周期帯域の記録を得ることができるという特長を持っている。しかも、その自由振動の記録を分析するのに必要な、大量の計算を実行できるコンピュータの発達が支えとなって、アメリカの研究者たちを中心に、さかんに自由振動の研究が進められた。

最近では電子回路を活用して、振り子の特性を制御することによって広い周期帯域と広い倍率の範囲を持つ地震計が開発された。この高性能地震計による観測網ができたため、地震学が大いに進んだ。

微小地震を観測する 高感度地震計ネットワーク

大地震はめったに起こらないが、小さい地震はたくさん起こる。地震の起こっている場所を調べるのに、そのような小さい地震に注目すれば、豊富な情報を短期間で得られるという研究上の利点がある。そのためには震源の近くに感度の高い地震計を置く必要がある。

日本では M1~M3 程度の地震を微小地震と呼ぶ習慣がある。微小地震が本格的に観測されるようになったのは、1960 年代後半である。1963 年から大学での微小地震観測網の設置計画が実行に移され、M1 というような小さい地震が、頻繁に起こっていることが明らかになり、それが一部の地域で連続的に記録されるようになった。

このような微小地震の観測のためには高感度の地震計が必要であり、10 万倍、100 万倍という倍率を得るための増幅器の発達が、地震観測にも役立った。増幅器が地震計に使われるようになったのは 1950 年前後からで、真空管方式、トランジスタ、IC の増幅器へと、エレクトロニクスとともに地震観測技術も発展した。

実際に地震が起こっている場所は、ときには人の住まない高い山地であったり、深い海底であったりする。そのような場所へ地震計を置くためには、さまざまな技術を駆使して、それぞれの地域の条件に適合した測定器を開発しなければならない。さらに、地震計を置いた場所の位置を正確に知らないと、震源の位置を計算したりできないから、ただ置けばいいというものではない。

さまざまな工夫で高感度地震計の観測網が整備され、それらが人工衛星回線や電話線で結ばれて観測センターに信号が送られ、全国をおおう地震観測のネットワークができあがっていくのである。

震央と震源 地震観測の仕事

地震観測の仕事は、まずは地球内部で、いつ、どこに、どのような地震が起こったかを、精度よく記録に残すことである。そして、そのデータを研究などのために、検索して利用できるように永久に保存しておくことがその目的である。観測での苦労は、記録の時刻の精度を保つことであったが、GPS 衛星が精度の高い時刻信号を出すようになって、この苦労は少なくなった。

世界の地震観測網は、最初はアメリカ合衆国が中心になって設置された。それは、冷戦という情勢の中で、西側諸国が東側の地下核実験を探知するために作ったものである。1960 年末までに、100 ヶ

所以上の観測点が設置されて、M5 以上の地震なら、世界中どこに起こっても見落とすことなく記録する能力を持つ観測網ができた。

具体的にどのように観測を進めるかという、まず、P 波や S 波などの、各観測点への到着時刻のデータから、走時曲線のデータにあてはめる作業をして、震源の位置と地震発生時刻を求める。それが震源決定の仕事である。次に記録の振幅からマグニチュードを決める。さらに、高性能地震計の波形からは、地震モーメント(80 ページ)も計算することができる。

震源の真上の点を震央という。観測点と震央を結んだ距離が震央距離である。いずれも、P 波の到着時刻から震源を決めるときに用いる用語である。小さい地震の時には震央距離が大きいほど揺れは小さくなると考えてもよいが、地震波は広がった震源断層面全体から出て伝わるので、M6 以上の大地震では、震央距離が離れていても震源断層面に近ければ揺れが強いということを忘れてはいけない。

日本列島の変形 年に数センチの変動

火山が並んだり、大山脈が形成されたり、地形がどんどん変わっていくような場所は、変動帯と呼ばれている。変動帯には島弧などの造山帯、大洋の中央海嶺、トランスフォーム断層などがある(第 1 章)。地震は、おもにその変動帯で起こっている。日本列島は島弧の集まりであり、造山帯そのものである。

地球表面に沿って十数枚のプレートが運動しているが、その速さや向きは、天体からの電波を用いる、VLBI(Very Long Baseline Interferometer)というシステムで測定する。その測定の実測値で、太平洋プレートは日本列島のほうへ、年間 10cm ほどの速さで動いていることがわかった。

日本の陸上の点の相対的な移動は、人工衛星を使って GPS で測定されている。GPS(Global Positioning System、汎地球測位システム)は、車のナビゲータなどにも使われている、人工衛星による位置測定のシステムである。地上から約 2 万 km の高度に軌道があり、周期 0.5 恒星日(約 11 時間 58 分)で地球をまわる GPS 衛星が 24 個以上あって、地球上のどこからでも、いつも 4 個以上の衛星が視界の中に入るような配置になっている。車などでは、自分の位置を 5m 程度の誤差で地図の上に表示できる。2 台の GPS 受信機による干渉法という方法で 2 点間の距離を測ると、数 mm の精度で測れる。国土地理院は、全国にほぼ 25km 間隔で基準点を置いて、そこに GPS 受信機を設置し、データを電話回線で集め、いつも基準点の移動量を測っている。それによって、日本列島の各地の変形が常時監視されている。

地殻応力場 日本列島の地下に働く力

日本列島に大地震が起こり始めたのは、約 100 万年前だと考えられている。その前にできた地層が、その後の地層と同じだけしかずれていないことから、それがわかる。ほぼ 100 万年前には、現在の伊豆半島が北上してきて本州に衝突し、日本列島近くのプレート運動が変化して、今の運動のパターンが始まったと考えられる。

地下の岩盤の中にたくわえられる力はストレスと呼ばれる(48 ページ)。岩盤に外力が加えられて岩がひずみ、元の形に戻ろうとする力である。日本語で「応力」という。このストレスが地震を起こすから、大地震発生の跡である活断層を調べると、その地域でのストレスの働き方を推定することができる。

内陸の活断層の分布図をよく観察すると、たいへん規則的であることがわかる。たとえば中部から北近畿の活断層には、走向が北西－南東のものと、北東－南西のものが多く傾向がある(29 ページ)。走向が北西－南東のものは左ずれの、北東－南西のものは右ずれの運動をする。この走向とずれ方の規則的な関係は、東西方向に押す力が働いていることを示している。その他に南北と東西の走向のものがある。これらの断層は北西－南東方向の押す力が働くと、それぞれ左ずれと右ずれを起こすことになる。

これらの押す力は、二つのプレートのもぐり込みに由来する。中部から北近畿には、太平洋プレートのもぐり込みでほぼ東西方向に、フィリピン海プレートのもぐり込みで北西－南東方向に、押す力がそれぞれ働いている。プレート境界地震の発生で押す力は変わるから、内陸の動きを確かめるのには複雑な計算が必要になる。

謎に満ちた海底 海洋底での観測

日本の地震に大きく関係する海のプレートの構造を見てみよう。海底と大陸で地殻は明らかに異なる。海底の地殻は薄く、厚さは **5km** くらいであり、構成する岩石は比重の大きい玄武岩質で密度が **3.0g/cm³** くらいである。一方、大陸の地殻の厚さは平均 **25km** で、厚い所では **70km** もある。大陸地殻では、海の地殻にある玄武岩質層の上に、密度 **2.7g/cm³** の軽い花崗岩質の層が乗っている。

プレートテクトニクスのもとになった大陸移動説は、古くはイギリスの哲学者ベーコンの指摘などに始まった。ドイツの地球物理学者ウェゲナーは、2 億年前に、パンジーアという一つの陸と、パンサラサという一つの海があって、それが分裂・移動して現在の大陸配置になったという仮説を唱えた。

イギリスの地質学者ホームズは大陸を動かす原動力にマンツルの熱対流を考えた。その後、大陸が裂けて広がる所に海が生まれるという海洋底拡大説が完成し、今では海洋プレートが移動する姿が、目に見えるほどに観測できるようになった。

海洋の研究は、海洋底を見ることから始まる。海洋底拡大の現場は、太平洋や大西洋など大洋にある中央海嶺である。米国大気海洋局(NOAA)は、1973 年から「大西洋横断地球科学計画」を開始し、1985 年には中央海嶺で水温や化学成分の異常を見つけ、さらにカメラをおろして、熱水を噴き出す巨大なチムニー(煙突)を見つけた。底の径が **250m**、高さが **50m** もあるチムニーは、金属資源や生命の誕生の過程を解き明かす上で重要なものになる。海の研究には、直接観察するシステムも重要である。

海底に置く地震計 全地球をおおう観測網

地震計を設計して新しい観測装置を開発する仕事も、地震学者にとっては大切な仕事である。しかし、観測方法や計器が未完成の場合もまだまだある。たとえば、火山のように高温の深い地下での観測がある。また南極大陸での観測のための計器開発も、環境の条約を守って、ゴミを出さない測定方法でなければならない。

観測困難な場所の一つに海底がある。しかも海底は、マンツルから供給された物質が新しいプレートになり、大規模に移動している所であり、地球内部の活動を知るために重要である。地球表面のほぼ 3 分の 2 の面積を占める海洋での地球科学の観測は、技術や費用の面で困難なため、最近まで実現しなかった。

海底での観測はこれから開拓していかなければならない面が多く、計器の開発から、現場での観測、データ解析の手法と観測結果の解釈まで、総合的に取り組むことの必要な分野であり、科学を志す若者には絶好の分野であろう。

東京大学地震研究所にある海半球観測研究センターは、太平洋の海底で観測をするための総合的な研究をおこなう所である。まず、長期間続けて地震波を記録できる地震計を開発し、海洋科学技術センターなどと協力して潜水艇で設置する。また、国際協力で固体地球の内部に向かって穴を掘る計画があるが、その孔内に地震計やひずみ計を設置できるよう、計器の開発もおこなっている。地殻熱流量の変化の測定も計画されている。古くなった国際電話用の海底同軸ケーブルを活かして、遠い 2 地点間の電位を測ることができるようになり、地球磁場や深部構造の研究にデータを提供する。

大陸の下のマンツルは冷たい 熱流量の測定

地球の中から表面に向かって、いつも熱が流出している。その熱流量を地球全体で見ると年間 30 兆ワットくらいになるという。地球表面の熱流量は HFU(Heat Flow Unit=毎秒 1 m²あたり 42 ミリワット)で表される。各地で、だいたい 1~10HFU の値が見られる。

地上で熱流量を測るのには、深さ方向の 2 点で温度を測り、その場所の岩石のサンプルを持ち帰って、その岩石の熱伝導率を実験室で測定して、これらの結果から熱流量を計算する。海底では、船から測定器を海底に降ろして、堆積物に測定器を突き刺し、精密に温度を測る。深い海の地域を含めて、すでにたくさんの測定データが広い地域で得られているが、この測定は時間と人手のかかる、たいへ

んな仕事である。

海底で測った熱流量の平均値と大陸の地表で測った平均値はほとんど同じである。ところが、大陸地殻の厚い地層の中にはウランなどの放射能を持つ元素が多く、地殻の中での発熱量が多いことがわかっている。一方、海の地殻では発熱量が少ない。したがって、地殻の下のマントルからの熱流量は海の地域の方が多いということになる。つまり、大陸の下の上部マントルは冷たいということになる。

プレートのもぐり込み口で、M8 クラスの巨大地震が発生する南海トラフなどでは、地震が発生する場所の温度構造を調べるのが重要な課題となっている。巨大地震の起こる領域での力学的な現象に加えて、物質がどのように移動し、温度がどのように分布しているかを把握することによって、巨大地震の発生する場所の環境を詳しく知ることができるからである。

重力と地下構造 地表からの診断

地球は自転しているので、地球上の物体は、地球との間の引力と自転による遠心力の両方の力を受ける。それらを合わせた力が重力である。地球上で、物体の落ちる方向が、重力の働いている方向であり、落ちるときの加速度を重力の値といい、それを Gal(ガル)という単位で測る。落体の法則を見つけた、ガリレオ・ガリレイにちなんだ単位である。1Gal は 1cm/s^2 で、これは 1 秒間に速度を、秒速 1cm だけ増加させる量である。地球上の重力値はおおよそ 980Gal である。赤道上と極地とで遠心力が異なるため、重力値に約 0.5% の差がある。また、高さ 1m ごとにおおよそ 0.0003Gal 小さくなる。

重力の測定には、絶対測定と相対測定がある。その場所の重力の値そのものを測るのを絶対測定、2 地点の重力の差を測るのを相対測定といい、使う計器が異なる。絶対重力計は日本に 4 台あり、 2μ (マイクロ=100 万分の 1)Gal の高い精度で測定をおこなっている。

相対重力測定は、ラコスト重力計などのばねの伸び縮みを利用した重力計でおこなわれる。各地の細かい重力値の分布などが測定されて、地下構造の解析や、地下の鉱脈の探査がおこなわれたりする。

地下構造の探査には、人工地震による反射法や屈折法、電気探査、磁気探査、重力探査、放射能探査、温度探査と、さまざまな方法が使われる。地中を掘削して岩石のサンプルを採取することも必要である。中でも重力探査は、測定がてっとり早くおこなえるために、初期調査のためによく用いられる。とくに、盆地や平野などの地下の岩盤の深さを調べたり、堆積層の下にかくれた断層を見つけるための予備調査などに威力を発揮している。

地球磁場や電気現象を測る 地磁気・地電流・電気伝導度

地球は全体が大きな磁石のようになって磁気(地磁気)を持っており、かつ電気がよく流れる性質を持っている。地球の磁場はプロトン磁力計やフラックス・ゲート磁力計などを使って測る。

地磁気の永年変化は、ゆっくりとした変化であり、ヨーロッパでは地磁気偏角が 400 年以上前から測定されていて、永年変化の様子を知ることができる。たとえばロンドンでは、はじめは東よりだった偏角が 1657 年にはゼロとなって、さらに西よりになり、1800 年代のはじめをピークに、また東よりに戻ってきている。

岩石の中には強い磁性を帯びたものがあり、また磁性は熱で失われるから、一度溶けて再び冷えたものは、そのときの地球磁場を記憶する。このようなさまざまな性質を利用して、地下の構造を調べるため、磁気測量のデータが使用される。磁場の測定データからは、地球のプレート運動や大陸移動の歴史を知ることでもできるし、現在の地球内部の状態の変化を知る手がかりも得られる。

一方、地球表層にはごく弱い電流が流れており、それを地電流と呼んでいる。測定するためには地上の 2 点間の電位差を測ることが多いので、地電位差と呼ぶこともある。また、人工的に電流を流してそれを検出し、地下の電気伝導度の分布を測定する方法もある。電気伝導度は、岩石が破碎されて地下水を含んだり、いろいろな現象を反映して変化する。また、岩石が破壊したり、化学反応を起こしたり、物質が流動することによっても、電位差や磁気異常が発生する。このような現象を地表から検出できるので、地磁気や地電流、電気伝導度の観測は、地球内部を探る大切な手段の一つである。

地震直前の地電流と電磁波 電磁放射と発光現象

浅い大地震の発生する数日前から直前にかけて、いろいろな種類の前兆現象が見られる。とくに電磁気現象では、多くの手法によって、いろいろな前兆現象が観測されている。

今までに知られている現象を、ゆっくりと変化するものから早く変化するものへ、順にあげてみると、もっともゆっくりした変化では、ギリシアの VAN 法が知られている。岩石のサンプルに圧力を加えていくと、破壊前に電流が流れるが、その現象を応用して地電流を測定し、大地震の直前の信号をとらえようという試みである。複数の長い電極基線を組み合わせて高感度の観測をおこない、地震の直前予報が試みられている。日本で同じ手法が有効かどうかの実験もおこなわれている。人工電波の出ていない 10 キロヘルツより低い周波数帯域では、大地震に先行する電磁波現象の観測報告が日本の科学者を中心に出されているが、落雷による電磁波が常時たくさん伝わっている帯域であり、落雷と地震との関係がまだよくわかっていない。ラジオ放送などの人工電波の多い周波数帯域では、電波の伝わる特性が変化する現象が観測されており、とくに超短波帯の FM ラジオ信号の伝播異常などが各地で観測されている。

地電流や電磁波の研究は観測例が少なく、大規模な観測による研究はこれからである。地下深い所から電磁波が地表に発射されるしくみ、それを観測する手法、また電波の伝播異常など、科学のテーマとして興味深い。岩盤の大規模な破壊である大地震発生にともなう電磁気現象も未確認である。強震動にともなう電気現象や大地震後の電波の伝播異常もあるが、これも今後の研究のテーマである。

宏観異常現象 中国の臨震予報

観測計器でとらえる現象だけでなく、その土地に暮らしている一般市民の観察による異常現象を、中国では宏観異常現象と呼ぶ。この呼び名が日本にも伝わって用いられるようになった。宏観異常現象は、大地震の数日前から、地震が発生する地域を中心に目立って増えるのが特徴である。とくに、1970 年代に中国大陸部で M7 クラスの大地震が次つぎと起こったときには、観測網の不備を補う意味もあり、組織的に宏観異常現象の観察記録が地震予報のために利用され、いくつかの大地震のときには、主要なデータとして直前予報に活用された。ちなみに、地震の直前予報を中国では臨震予報という。

大地震の直前に見られる宏観異常現象の種類は多いが、主なものを列举すると、動物の異常行動では、ネズミが電線にとまったり、犬が異常な鳴き声を出したり、冬眠中の動物が雪原に出てきて死んだりというように、たくさんの事例が記録されている。地下水では、水の枯渇や逆にあふれ出ることもあり、井戸水のにごりや味の変化もある。電磁気現象と思われる現象には、無線の通信障害や電気器具の誤作動、発光現象などがある。発光現象の中には、化学的現象と思われる発火現象もあり、実際に焼けた跡が残って撮影されたり現物が保存されたりしている。

中国の場合、宏観異常現象の観察が、専門家の指導のもとに組織的におこなわれ、事例を一つずつ評価しながら、データを統計的に処理して予報に用いたということが重要である。宏観異常現象から、計器観測で定量化できるように現象のしくみを解明することによって、実用的な地震予報に応用できるようになることが期待される。

深発地震の発見

地震波初動の 4 象限分布を発見した志田順は、その研究を続けていて、初動方向が震源とよく合わない場合があるのを見つけ、調べていくうちに、深さ数百 km 以上になる地震があることに気づいた。

志田は 1926(大正 15)年 10 月にこのことを「深発地震存在の提唱」と題して講演したが、これが世界ではじめての深発地震発見の報告であった。

この講演は、大分県別府市に設置された京都大学の地球物理研究所の開所式でおこなわれた。今、この建物は京都大学大学院理学研究科の地球熱学研究施設の一部で、地域の文化財の指定を受けている。

観測データが蓄積されることによって、それまで知られていなかった自然現象が発見されたり、そ

のしくみが一つ一つ解き明かされていくのである。

Chapter 6 噴火・津波と地震

火山噴火にともなう地震 地震が引き起こす津波

火山の山体は崩れやすく、地震が起こると危険である。とくに崩壊した大量の土砂が、一気に海に入ると津波を起こすこともある。また、海底の大噴火が起これば、そのために津波が起こることもある。海底で巨大地震が起こると、大津波が沿岸に押しよせる。噴火の前後にその地域で大地震が起こることもある。このように、火山噴火と地震、そして津波の相互の間には複雑な関係がある。この章では、とくに噴火にともなう地震活動と、地震が引き起こす津波に焦点をあて、日本列島の足もとの地殻活動を見ることにしよう。

島弧は、大陸と大洋の間にあって、火山帯を持つ弓なりの島であり、その大洋側には海溝が島に並行に存在する。島弧の火山帯の大きな特徴は、火山分布の海溝側に明瞭な境界線が引けることであり、この線を火山前線、あるいは火山フロントと呼ぶ。この火山前線の位置は、沈み込んだプレートの、深さ 150km くらいの等深線に一致する。日本列島には、東日本火山帯と西日本火山帯の二つの火山帯があり、前者は太平洋プレートの、後者はフィリピン海プレートの沈み込みによってできたものである。

火山の活動に関係して、さまざまなタイプの地震活動がある。火山性地震や火山性微動と呼ばれる活動があるが、これらは、かならずしも火山の噴火活動のときだけに起こるとは限らない。マグマの圧力の変化などで、マグマの近くの岩盤が破壊すると火山性地震となり、マグマや火山ガスの移動にともなって起こる振動などは火山性微動となる。火山性微動は地震のような急に始まる揺れではなく、だんだん強くなり、いつの間にかおさまるようなものが多い。

三宅島の火山活動 時々刻々移動する地震発生場所

2000 年 6 月 26 日の夕方、三宅島の地下から始まった群発地震と、三宅島の火山活動は、2001 年 9 月末現在まだ続いており、三宅島の住民全員が、故郷の島から避難したままになっている。

最初の群発地震の状況を、少しこまかく見てみよう。6 月 26 日 18 時 30 分ごろから、三宅島の山頂の西側で、深さ 2~3km の浅い地震が起こり始め、次つぎと起こる地震の震源位置は、しだいに山頂より南西方向の山腹の方へ移り、22 時ごろからは、島の海岸あたりで新しい活動が始まった。その後の地震の震源位置は、島の西の海域へはり出し、6 月 27 日の朝には、多くの地震の震源のかたまりは、島を離れて北西よりの方向へ移動し始めた(39 ページ)。また 6 月 28 日には、その北側に別の震源のかたまりができていた。

7 月 1 日 16 時 01 分には、神津島の近くで M6.4 の地震が起こり、その後の神津島の東側の活動が、三宅島から移動してきた活動とつながった。これらの地震を起こした力の向きを調べると、北西―南東方向に押す力が働き、それに直交して引っ張る力が働いていることがわかる。神津島の M6.4 の地震の余震域の活動は急速におさまり、神津島と三宅島の間あたりの活動が活発になったが、7 月 4 日にはまた神津島の東方に震源が移った。

このように、震源の位置は刻々と移動していくように見えるが、まとめて見直すと、いくつかの震源のかたまりがあって、それぞれのかたまりごとの地震活動が、息をするように盛衰をくり返しているとも見られる。重ねて全体を見ると、三宅島から神津島に向かって広がっていて、神津島に頭を置くナマズの形になっていた。

有珠山と三宅島の 2000 年の活動 噴火前の緊急火山情報

火山噴火予知連絡会は、1974 年 6 月に設置された。火山を研究する学者たちによって構成される専門家の集まりで、その事務局は気象庁地震火山部に置かれている。

この連絡会の役目は、火山に関する研究や業務をおこなっている機関が、おたがいに研究成果や観測情報を交換しながら研究を促進すること、火山噴火に際しては、総合判断をおこない、火山情報の質の向上をはかること、火山噴火予知の研究や観測の体制の整備を考えることなどとされている。具

体的には日本で常時観測の対象となっている、20 の活火山に関する観測データをはじめ、全国の火山に関する観測データが、年 3 回の定例会議で検討されている。

この連絡会の中に、伊豆部会と有珠山部会がある。この二つの部会が、2000 年には、次つぎと重要な情報を提供することになった。

2000 年 6 月 26 日 18 時半ごろから、東京都の三宅島で火山性地震が起り始め、急激に増加したとき、気象庁三宅島測候所は 19 時 33 分に噴火の恐れがあるという「緊急火山情報」を出した。それによってもなると三宅村では、20 時 45 分から三宅島の阿古地区、坪田地区に相次いで避難勧告を出した。同時に火山噴火予知連絡会伊豆部会は、記者会見をおこない、この緊急火山情報の背景を説明した。

緊急火山情報は、火山活動で人命に被害が予想されるような場合に気象庁から発表されるが、噴火前に出されたのは、2000 年 3 月 29 日の北海道有珠山に続いて 2 回目である。三宅島では地震が続き、急激な地殻変動や噴火と火口の陥没が起こるなど、未知の現象が多く続いて、2001 年 9 月末現在、まだ見通しがたたない状況である。

有珠山の噴火と低周波地震 噴火の予知

2000 年 3 月 27 日午前から、北海道の有珠山では、しだいに火山性地震が増加し、翌 28 日午後には、山麓で有感となる地震が多発するようになった。また、火山噴火の直前現象の一つである低周波地震も発生しはじめたので、政府は 29 日 11 時 30 分、有珠山関係省庁局長級会議を開催し、現地では 29 日 13 時 30 分に避難勧告を出した。18 時 30 分にはそれを避難指示に切り替え、3 月 30 日までにほぼ避難を完了した。気象庁は 29 日 11 時 10 分に「今後数日以内に噴火する可能性が高くなっている」という内容の緊急火山情報を出した。

3 月 29 日から 30 日にかけて、壮瞥温泉では震度 5 弱の揺れを 7 回観測し、地元で地割れや道路の亀裂などが確認され、31 日 13 時 10 分ごろに、有珠山の西山の西側のふもとで噴火がはじまった。7 月 10 日になって「一連のマグマ活動は終息に向かっている」という火山噴火予知連絡会の見解が発表された。

この一連の予知情報は、北海道大学の有珠火山観測所の観測によるところが大きい。この観測所は、1977 年 4 月に設立され、同年 8 月の大噴火を含めて、多くの貴重なデータと知見を蓄積してきた。その蓄積によって、噴火予知情報が、大きく進展した。活動の推移を解説し、見通しを明解に話す岡田弘さんに全国の人々が注目した。

有珠山は、歴史的には 1663 年から、たびたび噴火したことが知られている。噴火のたびに新しい山が成長した。1910 年には、7 月 15 日から地震が始まり、25 日に噴火して明治新山ができた。1943 年 12 月から地震が始まり、翌年 1 月末から始まった隆起は、1944 年 10 月末には 100m の高さになった。これが昭和山である。

火山地帯の地震活動 雲仙岳と伊豆半島東部を例に

火山の山体が崩れて津波を起こした例として、有名なのは、1792 年の「島原大変肥後迷惑」といわれた津波である。このとき、噴火の始まる 3 ヶ月前から地震が頻発し、約 50 日にわたる雲仙岳の噴火活動があった。そして、噴火停止後 1 ヶ月ほどして大地震が起こった。その大地震で眉山が崩壊して対岸に大津波がおそい、1 万 5000 人の死者を出した。日本の歴史上最大の噴火災害である。

雲仙岳はその後 198 年ぶりで、主峰の普賢岳が 1990 年 11 月 17 日に噴火を開始した。その噴火の前には 1 年にわたって地震活動が続き、それが水蒸気爆発となり、半年ほど噴煙活動を続け、3 年 9 ヶ月にわたって溶岩が噴出した。形成された溶岩ドームが崩れて、たびたび火砕流が発生した。噴火の前兆の群発地震は、1989 年 11 月 21 日、千々石湾から始まり、震源域が東へ拡大していった。1990 年 7 月には最大で M4.9 の地震が普賢岳付近で起こり、火山性微動も検出された。また普賢岳直下を通る地震波の減衰が大きく、そこに地震波を通しにくいマグマ領域が存在することを示していた。

一方、伊豆地域でも地殻活動が活発であり、噴火も地震もよく発生する。噴火にともなう群発地震も、浅い大地震も伊豆地域には起こる。1974 年ごろからは大地震が連発している。1974 年伊豆半島沖地震(M6.9)は半島南端の活断層に起こり、1978 年伊豆大島近海地震(M7.0)も震源断層の一部は陸にあった。1980 年に伊豆半島東方沖地震(M6.7)、1986 年には伊豆東方の大島三原山が活動した。伊豆

半島東部の大室山なども活火山で、周辺には火山群があり、しばしば群発地震が起こり、その地域の隆起運動も激しく続いている。

海底の巨大地震 何回トラフのプレート境界

日本の最高峰である富士山は、大規模な噴火活動で成長している活火山である。近くには箱根山や愛鷹山が、かつての激しい噴火活動の跡を見せている。富士山の最近の噴火は、1707年12月16日であり、そのときの噴出物総量は約8億m³、火山灰は東の方90kmにある川崎で、5cmの厚さに積もった。その少し前、1707年10月28日には、南海トラフに巨大地震(M8.4)が発生した。

プレートのもぐり込み口では、海洋地殻の上面が海溝からだんだん深くなって、陸の下へもぐり込んでいる。その中に大きな海山が隠れていることがある。この海山がプレート境界をしっかり連結させて沈み込ませ、巨大地震をくり返すのであろう。

南海トラフの巨大地震にもなって、いろいろな現象があることが知られている。次の南海地震は、上に述べたような海のプレートのもぐり込む運動で、確実に起こることがわかっている。この地震にもなって起こると思われる現象をまとめると次のようになる。

大地震と同時に、室戸岬、潮岬、御前崎などの岬は隆起し、岬に近い港は浅くなり、高知市や、紀伊水道や伊勢湾の沿岸は沈降する。その後に大津波が海岸をおそう。浜名湖の南側の出入り口が広がったり、逆に浅くなってふさがったりする。平野部では強震動で地盤の液状化が起こる。中央構造線近くの温泉では、湯の温度が変わったり、湧出が止まったりする可能性がある。過去には富士山などが巨大地震前後に噴火活動をする事例もあった。さらにこの巨大地震の前後数十年には、地域一帯で大中規模の地震の活動が活発になり、M7クラスの地震もその中に起こることが知られている。

津波の発生と伝わり方 数時間続く津波

大地震で海底に地殻変動があったり、地すべりが起こったり、海底で噴火があったりすると津波が発生する。通常の海の波よりも、ゆっくりと変化する波長の長い波になるのが津波の最大の特徴である。津波は外国でも tsunami と呼ばれる。

津波は、検潮所の水位変化の記録から測定される。海岸の近くに井戸を掘り、細い導水管で海底から海水を引き込み、井戸に浮かべた浮きの動きを記録する。この方法で、風波のような短周期の波による水位変化を除いた、ゆっくりとした変化だけが記録される。

津波の規模は、波高や被害の広がりなどで何段階かに分類されることが多いが、一般に地震のマグニチュードが大きいほど、また震源が浅いほど、引き起こされる津波の規模は大きくなる。海岸では、地形などによって波高の増幅作用がある。また、津波は第一波よりも後のほうで水位が高くなるものが多く、数時間くり返して海岸をおそってくるということをよく覚えておかなければならない。

日本では、島弧の沖に巨大地震の起こるプレート境界があり、そこには大陸棚と呼ばれる傾斜のいちじるしい海底がある。一方、津波の伝わる速さは海の水深が深いほど速いので、一度沖へ向かって出た波も海岸へまわり込んでくるように曲がる。そのために、津波のエネルギーの約4分の3が日本列島の岸に押しよせることになる。

各地の津波の到着時刻から、津波の発生した位置を理論的に計算すると楕円形となり、震源断層面の真上にほぼ重なる。それを波源域と呼ぶ。このことを利用して、計器観測データのない時代の津波の資料から、巨大地震の震源域や規模を推定することができる。

日本の津波の事例 日本史上最大の津波

北海道南岸から三陸にかけては、日本海溝に沿って、津波をとまなう巨大地震がよく起こる地域である。1896年の三陸地震による大津波では2万人以上の死者を出した。三陸沿岸では住民の半数以上が死亡した市町村も多く、全員が水死した海岸の集落もある。その後も、1933年の三陸地震津波、1952年の十勝沖地震津波など、最大級の津波が次つぎと発生している。

東北から北海道では太平洋側の津波が多く、しかも大規模であることから、日本海側を忘れがちであったが、1983 年の日本海中部地震(M7.7)、1993 年の北海道南西沖地震(M7.8)による津波の被害が大きかった。これらの震源断層面は海岸に近いために、はげしい地震動があつて 10 分以内に津波の第一波が到達することもある。

関東南部では、フィリピン海プレートのもぐり込み口である相模トラフに沿って巨大地震が発生し、房総半島や相模湾沿岸に大きな津波被害をもたらしている、1703 年の元禄地震と 1923 年の関東地震は、ともに相模トラフに起こったプレート境界地震である。1605 年の慶長地震は、房総沖から南海トラフまでのプレート境界が一度に動いた巨大地震で、日本の南岸に大津波をもたらした。

西南日本では、南海トラフの巨大地震が、駿河湾から四国、九州の海岸にわたって大津波をもたらす。最近では、1944 年東南海地震と 1946 年南海地震の巨大地震が隣接して起こった。

琉球列島では、近代では、1911 年の地震(M8.0)で 1m の津波があつた程度で少ないが、日本史上、最大規模の津波は、1771 年の八重山地震津波で、八重山諸島で 9,209 人の死者が記録された。

ゆっくり地震という地震 チリ地震津波

三陸沖に、1992 年 7 月、M6.9 の地震が発生した。地震計に記録された地震波の振幅から気象庁が発表したのが M6.9 だった。ところが、土地の伸び縮みを測定する伸縮計の記録に、地震波よりもはるかにゆっくりとした動きが記録されていることがわかって、その動きから、震源断層面の大きさを計算してみると、M7.7 に相当するずれが発生していることがわかった。このように、土地の動きがゆっくりで、震源断層面の規模のわりに大地の揺れが小さい地震がときどき起こることが最近わかって、「ゆっくり地震」とか「サイレント地震」の名で呼ばれるようになった。

1996 年 5 月 19 日と 21 日の房総半島に起こった地震の場合は、ともに M3.9 の小地震だったが、房総半島の東海岸近くでは、1cm 以上になる南東方向への水平変動が GPS で検出された。M3.9 の地震にしては、たいへんに大きな変動であり、震源断層面で大きくすべりを起こした「ゆっくり地震」だった可能性がある。

また、地震の揺れはあまり感じなかったが大津波が来たという現象は、津波地震と呼ばれる。たとえば、1896 年の三陸海岸の大津波では、津波の高さが 24m にもなったけれども、地震による揺れはそれほど大きくなかった。このとき地震計記録からは M6.8 と計算されたが、津波をもとに計算すると M8.6 にもなった。

ゆっくり地震ではないが、遠地津波でも地震の揺れを感じないのに津波がくる。1960 年 5 月 22 日のチリ地震津波は、日本にも大きな影響をもたらし、死者・不明者 142 人という被害があつた。これをきっかけに、津波警報システムが太平洋沿岸全域に設置された。

津波予報 揺れを感じたら予報に注意

津波被害の軽減のために、気象庁は 1999 年 4 月から、新しい津波予報の方法を導入した。それまでは、過去に起こった地震のマグニチュードと、それによって引き起こされた津波の規模との関係をまとめて、津波予報図という図を作つて津波の規模を予測していたが、地震は、岩盤が破壊する現象だから、かならずしも過去にちょうど合う例があるとは限らない。

新しい津波予報の方法では、津波の高さを海岸各地でこまかく予測できるように、数値シミュレーションをおこなうことにした。ただ、地震が起こってから全部の計算をしていると間に合わないから、コンピュータ上であらかじめ日本近海の各地に地震を発生させ、各地の津波を計算した結果をデータベースとして蓄積しておく。地震が起こると、そのデータベースの中から震源断層面の位置や規模がよく似た場合を選び出して、予測データを取り出すことにした。これによって海岸の区分ごとに、津波の高さを数値で予報することができるようになった。

実際のシミュレーションでは、海底地形のデータを入力し、震源断層面を動かして海底の変動を計算し、津波の発生と伝わり方を計算して、海岸での波高を求める。震源断層面の場所は 4000 ヶ所、その大きさなどを変えて、約 10 万個の地震を発生させた。

発表される予報は、津波警報に「大津波」と「津波」があり、津波注意報に「津波注意」がある。たとえば「大津波」だと、3m、4m、6m、8m、10m 以上という高さで発表される。また、予報区を

今までの 18 から 66 に細分化し、防災対策をおこないやすくした。

地震の間

滋賀県の彦根城にある井伊直興(いいなおおき)が作った楽々園に「地震の間」が現存する。琵琶湖のある近江盆地も、活断層性の盆地だから大地震が多い。畿内では「地震雷の間」という特別の部屋が、公家や大名の屋敷にあった。江戸城にも「地震の間」という避難場所が作られていた。「地震口」という非常口もあった。雨戸に開けた小さい出口で、掛金をはずすと、ばねじかけで開くようなしくみであった。

がっちりと組んだ地震の間とは反対に、軽く作って強震動の影響を逃れる智恵もあった。千利休が作った茶室は土台に固定されていない。神戸で経験されたような、直下の大地震の激しい上下動があると全体がぴょんと飛び上がる。飛び上がっている間は大きな横揺れの力は加わらないというしくみだ。

Chapter 7 活断層と都市

活断層とは何か 地表に現れた地震断層

活断層という呼び方は、国によって、あるいは研究者によって、さまざまに定義されて使われているので、そのまま比較することができない。ずいぶん以前に動いたものを含めて活断層と呼ぶと、活断層が多すぎて、防災対策の基準を制定したりするときに目標が不明確になる。ただ、断層運動が止まっても、過去の断層運動で作られた地下構造は残っているから、地下構造に関係する揺れの増幅作用などは存在する。

断層という語は、もともと見ることのできる地表のずれを呼ぶ語であったが、地震学では、計算で求めた地下の岩盤中のずれも、断層とか断層面とかいう言葉で表すようになった。地震は岩盤の中に破壊面ができることによって起こることは 2 章でも述べたが、もう少しそれを詳しく見ると、まず、岩盤の中のある所から破壊が始まって、破壊面が急激に広がり、その面で岩盤がずれる。このとき、割れ目の先端が走る速さは、毎秒 2km~4km ぐらいである。割れ目の拡大が 1 秒で止まれば、中規模の地震となり、10 秒以上止まらなければ大地震となる。大地震となると、割れ目は地表にまで達することがあり、このとき地表に出現した割れ目を地表地震断層という。

たとえば、1995 年兵庫県南部地震のときには、岩盤の中の破壊は、明石海峡の地下、深さ 14km くらいの震源から始まった。破壊面の先端の一方は神戸市の地下 3km あたりに達し、もう一方は淡路島の方へ走って、地表にまで破壊面が達したのである。これが淡路島北部の野島断層のずれであった。

地表地震断層 トルコの地震と台湾の地震

震源断層面が地表にまで現れると、地表でずれを見ることができるようになる。これが地表地震断層であるということは前項でも紹介した。単に地震断層と呼ばれることもある。1891 年の濃尾地震の地震断層は岐阜県根尾村の、1995 年兵庫県南部地震の地震断層は淡路島の北淡町の、それぞれ断層観察館に保存されている。濃尾地震の地震断層は、地質学者の小藤文次郎(ことうぶんじろう)の論文によって世界で初めて写真で紹介された地震断層である。

もともと知られていた野島断層のずれは、同じような大地震がくり返し発生して、ずれを蓄積した跡だった。1995 年 1 月 17 日の明石海峡の地下、深さ 14km の破壊の始まった点が、地震波の記録をもとにコンピュータで計算して求められた震源の位置である。破壊面が拡大して止まった後、地震波の記録から地震の全体像がコンピュータで計算される。破壊面が大きく広がったとき大地震となる。震源断層面全体から、次つぎに地震波が発射されて四方へ伝わっていくから、大地震になるほど、大揺れの地域は長くなり、大揺れの続く時間も長くなる。それで、広範囲に被害が拡大することになる。

1999 年、トルコに起こった大地震は、水平右ずれの地表地震断層の運動で、まっすぐだった線路が大きく変形してしまった。同じく 1999 年の台湾の大地震は、逆断層運動で発生し、東側の地盤が西側の地盤の上へ、大きくのし上がるように、ずれが起こった。もともと水平面だった運動場のトラックが割れ、その割れ目が、まるでブルドーザで押したように乗り上げた(右ページ下)。このとき、地表でのずれは 8m 以上になった所があった。

地震のマグニチュードと活断層 活断層は短くても大地震

大地震を起こす活断層では、大地震のとき地表までずれが到達して現れることがある。中小規模の地震では、ずれが地表に達することはない。M7 前後(M6.8~M7.3)の地震では、地表地震断層が出たり出なかったりする。岩盤中の破壊の始まる点、つまり震源は、深さ 10km ないし 20km ほどの所にできることが多いから、地表にずれが出現するのは大地震のときだけである。

マグニチュードの小さい地震で、地表にずれの運動が出現することはまれであるが、1965 年から始まった松代群発地震のときには群発地震全体で M6.4 相当の規模だったにもかかわらず、地割れの水平ずれが 0.5m ほどになった。非常に浅い所で水やマグマが移動して岩盤が変形し、群発地震や地割れが発生する特殊な事例である。

数の上では圧倒的に多い中小規模の地震の震源断層面は、地下にたくさんできている。地表でも岩盤の中に小さい断層はたくさん見られるが、それは、かつてその岩盤が地中にあったときに小さい地震を起こした跡で、岩盤が隆起して地表に出てきたのかもしれない。

活断層の中には、中央構造線活断層のように、九州から四国を東へ、さらに紀伊半島の中ほどまで、数百 km におよぶ長いものがあるが、それが一度に動いて巨大地震を起こすわけではなく、いくつかの区域に分かれて活動する。したがって 1 ヶ所の調査だけから、その活断層の全体像を把握することはできない。経験的には、短い活断層では M6.8、長くなると M8 クラスというように、いずれにしても大地震ではあるが、活断層の規模と発生する大地震のマグニチュードには相関が見られることにも注目しなければならない。

活断層が都市をつくる 西南日本の大都市には大地震

第 1 章では、地震の起こる日本と、地震の起こらないイギリスをくらべてみた。それでは、いったい日本とイギリスの大地の特徴に、どんなちがいがあのだろうか。地図に描かれた情報から何か読みとれることがないか、世界地図を観察してみてほしい。地図帳を参考にして、日本とイギリスをくらべると、面積は日本が 37 万 8 千 km² ほど、イギリスが 24 万 4 千 km² ほどである。日本はユーラシア大陸の東の端に、イギリスは同じユーラシア大陸の西の端に近い。つまり、世界地図の上では一見同じように見える島国である。

山の高さが色分けで示されている地形図を見くらべると、まず、日本には 3000 メートル級の高い山地があるが、イギリスにはそれほど高い山がないことに気づくだろう。大地のこのような特徴が、地震の起こることに関係があるのだろうか。この疑問を記憶にとどめておいて、日本列島の歴史と地震の起こるしくみを考えてみよう。

日本列島は、海底で堆積した岩盤が隆起し、それに伊豆半島のように衝突して合体した付加体と呼ばれる岩体加わって成長した、変動帯の島である。数十万年前から続いている今のプレート運動で、日本列島には水平方向に圧縮力が加えられ、そのために岩盤がひずみ、ストレスが蓄積される。このストレスを解放するために地震が起こり、活断層が発達する。活断層のずれは蓄積して、隆起した側の岩盤は数百 m の山地となり、そこから浸食で流出した土砂は、沈降した側の岩盤に堆積し、盆地や平野が発達する。そこに大都市が生まれる。したがって、大都市の直下やすぐ近くには活断層があることになり、大都市直下には大地震が起こるという関係になる。

竹の子の産地が破碎帯に沿う 名水百選と活断層

大都市直下の活断層が動いたときの浅い大地震を、よく直下型地震と呼ぶことがある。直下型地震という用語は、地震学用語辞典にはないし、対応する英語もないが、日本では都市直下の浅い地震を呼ぶときによく使われることばである。このような地震は、震度 7 というような最大級の揺れを都市にもたらし、大震災を引き起こす。

盆地や平野の堆積層の地盤には、強震動によって液状化する性質があり、大揺れのとき砂や水が噴出して地表が変形したり、地下のタンクなど、人工の埋設物が浮上したりする(液状化現象)。また、堆積層の地下構造によっては、強震動を増幅する作用がある。

活断層の上には、隆起した山地から流出する土砂が扇状地をつくる。その背後には張り出した小さい尾根が上下運動で切り取られて、三角末端面が並び、さらに背後の山地は、上面が水平に近い山脈となる。尾根が水平に近い性質を持つことを定高性があるという。

盆地や平野の地下に活断層があったり、活断層に沿って長い谷地形が発達している所は、大地震が恐ろしいが、それは数千年に 1 回、たかだか数十秒のことで、それ以外のとき、人々は活断層運動の結果を大いに利用して、恩恵を受けていることも忘れてはいけない。

活断層運動で谷や平野ができると、活断層に沿って岩がくだけた破碎帯には、崩れやすいので竹が植えられた。それが京都市の西山などの竹の子の産地となった。扇状地は見晴らしのよい台地となり、京都市東山地域などのように、寺などの文化財が並ぶ地形となった。また、破碎帯に沿って茶の湯の井戸があったり、日本酒の蔵元が並んだりする。活断層が良質で豊かな地下水を提供してくれるのだ。

水平ずれと上下ずれ 水平にも上下にもずれる断層

ずれの向きが地表に対して主として水平に近いのか、水平面に直交しているかで、水平ずれ断層あるいは上下ずれ断層と呼ぶ。水平ずれ断層の中で相手が向かって右へ動いたものを右ずれ、左へ動いたものを左ずれという。上下ずれの中で、一方がずり落ちたものを正断層、のし上がったものを逆断層と呼ぶ。ずれの向きが水平に近いものを低角逆断層地震と呼ぶこともある。

日本列島は、大地震や噴火でできた島々からなる。したがって地形は複雑であり、山や平野の地下にたくさんのトンネルが掘られて、わたしたちは生活の中でそれを利用している。その結果、道やトンネルは、多くの場所で活断層を突き抜けて走っていることになる。大地震が起こったときにはトンネルもずれる場合がある。

ちょうど電車が走っているときに、ずれが起こったことはまだないが、トンネルの工事中に、ずれが起こった事例はある。1930年11月の北伊豆地震のとき、熱海と三島を結ぶ丹那トンネルの三島側からの工事の先端近くが、2mほど左ずれを起こした。すでに両側から掘り進んでいたトンネルがずれてしまったので、途中で少しルートを曲げて修正して完成したから、トンネルは大地震を起こした左ずれの運動を、線路の形で記録していることになる。大地震の後、工事中だったトンネルの突きあたりには、ぴかぴかになった断層鏡面が現れたといわれている。その後つくられた新幹線の走っている新丹那トンネルは、まっすぐ走っている。次の大地震のときには、旧東海道線の丹那トンネルには2回の大震災によるずれが、新丹那トンネルには1回のずれが、それぞれ見られることになる。

活断層の調査 活動の履歴を知る

地質学の調査から、多くの活断層など、現在のプレート運動で活動した跡は、今から100万年ほど前以降、活動をくり返したと思われるものが多い。日本ではとくに最近約50万年の動きが顕著で、その間に動いた断層を活断層と呼ぶのがよさそうである。その中でも最近の数万年に動いたものは、とりわけ重要であろう。

東京大学の犬塚弥之助が、活褶曲について1941年に研究発表をして以来、多くの研究で活断層の知識が蓄積された。とりわけ、活断層を横切って深い溝を掘って、きれいに削った壁面を調べ、地層に残された活断層の最近の運動を読みとることによって、多くの重要な情報が得られるようになった。このような調査を、トレンチ掘削調査という。昔の海底で堆積した地層がある所を掘削すると、活断層の歴史を知るのに重要な情報が提供される。

たとえば、1930年北伊豆地震でずれた丹那トンネルの上に丹那盆地があり、そこで活断層のトレンチ掘削調査がおこなわれ、その結果、最近の6000年間に9回のずれが発生したことがわかった。そのうちの最新が1930年、その前は『続日本後紀』に出てくる841(承和8)年の「伊豆国大地震」であることがわかった。この地震の前、838(承和5)年の神津島噴火の際、その火山灰も、このトレンチ調査で活動の年代を決めるのに役立っている。同じ活断層で2回以上の大地震を歴史資料と対比できた事例は、日本ではこの丹那断層だけである。このように、活断層を詳しく調査・診断し、それぞれのカルテをつくっておいて、しかも一つ一つの活断層が主治医を持つようになると、震災の軽減に効果を発揮する。

中央構造線の謎 いくつにも分かれる大地震

中央構造線は世界的に見ても有数の大規模な活断層である。地質境界としての中央構造線は紀伊半島を横断して中部地方に向かうが、活断層として動く部分は、紀伊半島の中央部から西の部分である。和歌山県と大阪府の境になる和泉山地の南側に沿った部分では、1000年あたり5mほどの活発な動きがあるが、歴史資料の中に、この部分が動いて起こった大地震は見つかっていない。

中央構造線の四国部分も1000年あたり5m以上のずれがある活発な活動をする活断層であり、M7クラスの大地震を頻繁に起こすと思われるが、歴史資料からは明瞭な活動履歴が見つからない。トレンチ掘削調査で7〜8世紀以降に動いたと考えられる証拠が得られた可能性も指摘されており、

もしかしたら 1596 年の有馬-高槻構造線(次の項目で詳しく説明する)の地震の前後に連動して大地震を起こしたかもしれないといわれている。

中央構造線の西への延長は、九州にまで達するが、大分から阿蘇山を経て雲仙岳へ至る地域は、南北に伸びる力が働いていて、正断層型の地震が多い地域である(別府島原地溝帯)。この地域の南になる熊本県には、日奈久断層があり、北東-南西方向の長い活断層に沿って、現在、中小規模の地震が多く起こっている。

中央構造線の徳島県部分、つまり吉野川が東へ流れる部分に沿って、1596 年に有馬-高槻構造線の運動と連動して、あるいはその直前の、九州に近い西の部分の運動と連動して動いた可能性がある。しかし、もし 400 年前に動いていたとしても、中央構造線の活動度は非常に高いので、次の地震は近いかもしれない。

有馬－高槻構造線の歴史 トレンチ掘削調査は語る

中央構造線とほぼ平行して、六甲山の北側山麓から東へ、高槻市を通り、京都盆地の南西の端あたりまで、有馬-高槻構造線の活断層が走っている。この構造線は丹波山地と南の平野を境する地質境界で、その線に沿って活断層運動が、くり返し起こっている。

阪神・淡路大震災の後、各地で活断層の最新活動時期や活動の平均くり返し時間間隔を知るためのトレンチ掘削調査がおこなわれた。中でも有馬-高槻構造線は、一段と念入りに調査された活断層の一つであり、10 ヶ所以上のトレンチ掘削調査の結果、1596 年にまちがいなく大地震を起こし、全面的に動いていることが確認された。

1596 年 9 月 5 日(慶長元年閏 7 月 13 日)の大地震は、古文書から詳しく調べられており、M7.5 と推定された。京都では三条から伏見の間で被害が最も多く、伏見城の天守が大破し、城内で 500 人もの圧死者を出した。堺でも死者は 600 人余、高野山では大塔の九輪の四方の鎖が切れた。余震は翌年 4 月まで半年間も続いた。

同じように古文書から明らかになった、16 世紀末から 17 世紀にかけての大地震がいくつかある。上述の地震の前日 9 月 4 日には、豊後に M7.0 の大地震があり、大津波で別府湾沿岸では被害が大きかった。また、その 10 年前、1586 年(天正 13 年)には、畿内・東海・東山・北陸諸道を揺るがす大地震があり、また、1605 年には、M8 クラスの巨大地震が南海トラフに起こった。ほぼ同時に二つの地震が起こったとする考えと、東海沖の一つの巨大地震とする考えがある。このように一連の大地震が起こる中で、一つ一つの大地震がどこで起こったかをトレンチ掘削調査で明らかにしていくのである。

六甲－淡路断層帯 1995 年兵庫県南部地震

淡路島の野島断層が、活断層という認識で地質図に示されたのは、1975 年ごろであった。淡路島北部の中心部を構成する花崗岩体と、島の北西部の第三紀ないし第四紀の地層とが、この野島断層で接している。1995 年に大地震が起こるよりも前の調査で、最近 2 万年の間に約 20m の右ずれがこの活断層系にあったことが知られていた。つまり活断層であり、大地震をたびたびくり返して起こしていることがわかっていて、この 20m のずれは、2 万年前に平坦な面としてできた段丘面が、活断層の運動で島の中心部側、つまり山側が 9.5m 高くなり、しかも 20m ほど南西へずれた動きが確認されていた。この場合、上下のずれも水平のずれも、相対的なずれである。

1995 年兵庫県南部地震の震源断層面のずれが地表に達して、この野島断層でも約 2m の右ずれを示した。上に述べた 2 万年間に 20m という値と今回の 1 回の地震で 2m ずれたという結果を、単純に比較すると、平均 2000 年に 1 回ずれるということになる。しかし、地震は岩盤の破壊で起こる現象だから、あるときには、ずれが 1m だったり 2m だったり、間隔も 1000 年だったり 2000 年だったり、あるときは 500 年だったり、大きく変化してきたかもしれない。

大地震の前後に起こる地殻変動などを人工衛星からとらえるレーダーを、合成開口レーダーという。同じ場所を、時間をおいて 2 回撮影して、画像データをコンピュータで処理すると、2 回の間に起こった変動を 1cm 程度の精度でとらえることができる。1995 年兵庫県南部地震の前後では、淡路島北部の 70cm を超える隆起や、六甲山の隆起、神戸市街地の右横ずれ運動などもとらえることができた。

活断層法の提案 日本学術会議の対外報告

科学者の国会といわれる日本学術会議は、阪神・淡路大震災調査特別委員会を設置して、震災軽減に関連するいくつかの重要な対外報告を出した。その中で、『活断層法』を制定し、特定の活断層上はグリーンベルトとして建築を禁止するなど、活断層の性状に応じた災害対策の具体的指針を示すべきであり、そのための検討を早急に開始すべきである」ということを政府などに勧告した。

活断層上に建物が存在した場合、その活断層帯が大規模な地震を起こしてずれると、建物は引き裂かれることになる。こうした事態を回避するためには、活断層上に建物を建てることを制限する方向で検討すべきであり、そのためには「活断層法」を早急に制定することが望まれる。「活断層法」においては、土地利用のあり方について定めるものとする。たとえば、あらかじめ分類して地域指定をしておき、活断層の分類に応じて、緑地帯としての利用のみしか許可しないとか、あるいは、公共施設の建築は禁止するとか、場合によっては建築物の施主にその建築予定地の調査を義務づけ、その結果に応じた建築物の設計をするといった内容を定める。

強震動による震災の防止などは建築基準法などでおこなわれており、活断層のずれによる被害についてのみ、現在まったく法的な措置がとられていない。活断層にはさまざまな形態があるが、活断層は地下の岩盤のずれが生み出す地表のずれだから、堆積層がうすくて地表近くに岩盤が出ている場所では活断層の位置が明瞭である。「活断層法」はそのような地域を対象にする。カリフォルニア州の州法では、1972年にこのような趣旨の法が制定されている。

京都盆地の構造 多くの活断層がつくった盆地

京都市が 1995 年度から実施した一連の調査で、京都市域には活断層系が集中していることが明らかになった。西の三峠断層帯から続く西山断層群、その南に有馬・高槻構造線活断層や交野断層、南東側には黄檗断層や井手断層、北東には花折断層系や琵琶湖西岸断層帯、桃山丘陵の両側には桃山断層や勧修寺断層というように、京都市は、多くの活断層運動がつくりあげた盆地にできた都市である。

市街地がある京都盆地では、地下構造はほとんど知られていなかった。1998 年度からの地下構造調査で、京都盆地の地下数百 m の深さの所に岩盤の上面があり、その上に最近数十万年の間の堆積層が層構造を作っている様子を、断面図で観察できるようになった。

1998 年度には、京都市のほぼ中央を南北に走る堀川通りに沿って北山から宇治川の南に至る京都盆地の南北断面が描かれた。また、1999 年度には、十条通りに沿って東西方向の断面を描くのと、南北と東西の測線の交点付近で深いボーリング孔を掘削して、地下の地層のサンプルを採取する調査がおこなわれた。この調査の結果、はじめて京都盆地の地下の構造を見ることができたが、とりわけ東西断面が、両端の活断層運動にはさまれて形づくられた京都盆地のでき方をいちばんよく表現していると思われる。

また、350m の深層ボーリングは、深さ 223m で岩盤に到達した。その地層のサンプルには数十万年間の堆積の歴史が刻まれ、海が進入した証拠である海成粘土やカキの殻も採取された。このように京都盆地の地下構造が明らかになると、大地震のときにどのように揺れるかを予測することが可能になり、地震対策の進展が期待される。

京阪神名古屋の活断層 特定観測地域の一つ

盆地の堆積層の構造を調べ、地震のとき、地表の各地点でどこがどのように揺れるかを予測する。地下 1000m 以上の深さまで堆積層の地下構造を調べるには、人工地震の P 波や S 波を記録して分析する。

地下に密度の異なる地層が重なっていると、地震波がその境界面に到達したとき、一部分はその境界面で反射して地表に戻ってくる。その記録をもとに、理論計算をくり返して、地下構造の断面図を描くのである。この方法を反射法人工地震探査という(115 ページ)。

人工地震探査には、いろいろな方法がある。人工震源には、大型の震源車を移動させながら地面を

揺るものもあり、また、ダイナマイトや空気銃で地震波を発生させる方法もある。

活断層帯に囲まれた大都市として、大阪・名古屋・京都などが典型的である。これらの地域は地震予知連絡会によって特定観測地域に指定されている。名古屋は、西に養老断層、南に天白河口断層や伊勢湾断層、北には岐阜―宮線があり、大規模な断層運動で広大な濃尾平野が発達した。奈良は京都と同じように活断層運動が高低差を生んだ盆地である。近江盆地も、琵琶湖を含んだ大盆地である。大阪や神戸は、一方が海の都市であるが、大阪湾にも活断層があることがわかっている。このように、京阪神名古屋を中心とする地域は、活断層運動による平野に発達した都市の典型である。

盆地に都が生まれたのは、日本の手本となった長安や、朝鮮半島の新羅の都の慶州も同様であり、活断層運動による盆地にある。長安のあった渭河盆地の現在の華県付近には、1556 年に大地震(M8)が発生し、83 万人の死者という世界史上最大の震災となった。

震災の情報

人工衛星で撮影した地震前後の映像から、地表の変動を測る合成開口レーダーで、大きめの地震があるとその地震による地殻変動が、比較的短時間で発表される。高性能の地震計記録と、このような地殻変動のデータによって、どのような地震が起こったかの概要を短時間で知ることができる。

たとえば、1997 年 3 月の鹿児島県北部の地震では、震央の北側に 6cm の沈降、南側に 3cm の隆起があり、その観測データと、断層モデルから理論計算した上下変動のパターンとが、たいへんよく一致していた。

大震災のとき人命を守るには、できるだけ早い救出活動が大切である。そのためにも、どんな地震が起こったかを、すぐに知るためのシステムを、今後とも整備していかなければならない。

Chapter 8 震災の軽減

地震災害の軽減 備え・救出・復旧

日本を表す特徴的な自然をあげるとすると、何といっても変動帯の姿である。大地震も大噴火も自然現象である。それらでできた日本列島を、もし海底から見上げるならば、それは世界一の大山脈である。このような自然と共生する知恵が、日本には育まれているはずである。この章では、地震と震災の関係を意識しながら、大規模な地震活動のある日本列島に暮らすわたしたちにとって必要な、震災を軽減するための方策を考えてみたい。

震災の死者を減らすためには、救出活動の立ち上がりの早さが不可欠である。大地震で生き埋めになった人の生存救出率を調べると、地震後 1 日では 80%、2 日目 30%、3 日目 15%、4 日目 10%と、小さくなる。1995 年阪神・淡路大震災のときも、1976 年中国唐山地震でも、1980 年イタリア南部地震でも、この傾向は同じであった。

強震動による都市の震災は、さまざまな要因が重なって大規模になる。警察や消防力の不足、建物の倒壊による生き埋め、同時多発する火災、病院機能の麻痺、情報の遅れなどが、大震災の後の教訓として、次の震災を軽減するために分析される。

情報をそろえるのには一定の時間を要するが、震災対策には速報が重要である。有感地震の場合、まず各地の震度の分布などを気象庁が発表し、しだいに情報を加え、修正する。内陸大地震では、震源断層面の近くで情報が発信できないほどの被害が起きている場合もある。1995 年以後の整備で、強震計のデータが準リアルタイムで伝送されるようになったので、大揺れの地域の状況の概略が把握でき、救援体制の立ち上げが早くできるようになりつつある。

地震の知識の普及 地震調査と広報

大地震が起こったとき、たとえば震源の位置、マグニチュード、各地の震度、場合によっては自身の揺れの体感も含めた少ない情報をもとに、たとえ地震の全体像を描くのは難しいとはいえ、津波や震災の可能性があり、ラジオなどで情報を確認する必要があると判断できたほうがいい。地震に関する知識がそのために役立つ。

伊豆半島の東部で、群発地震がくり返し発生し、そのたびに水平変動と同時に隆起する変動が続いている。また伊豆の東部から南へ続く地域は、地震と火山の活動の活発な地域である。伊豆には温泉地が多く、首都圏から近いこともあって観光客が多い。地震や噴火の情報は、その観光産業にも影響を与えるので、情報の提供が慎重になる。しかし、情報が十分に提供されないことによる影響も忘れてはならない。そのことを考えるために、神戸市の事例をあげよう。

神戸市は、市域の地震に関する調査を専門家に委託して、その結果をまとめた「神戸と地震」という報告書を 1974 年に発行した。その報告書は、神戸市に影響を与える震災の可能性をまとめた。その一つに、神戸市直下の活断層に発生する大地震を想定し、「壊滅的な被害を受けることはまちがない」と報告されていた。

神戸市の報告は、東京都の活断層調査の開始や、国の地質調査所に地震地質課ができたのよりも早く、1974 年に活断層の存在を指摘したものであったが、20 年後市民はほとんど覚えていなかった。

このことから得られる貴重な教訓として、地震に関する情報は、単に一度提供されればいいというものではなく、公的な機関などによる系統的な広報活動が続けられていなければならないといえる。

地震・火山庁の提案 日本学術会議の報告

基本的な知識の中で、用語の問題が大切である。わかりやすくまちがわずに本質を理解することのできる用語を、一つずつ吟味しながら使うことが必要である。たとえば、マグニチュードと震度を取りちがえるのをどうやって防ぐかは、長年の課題である。地震予知に関する誤解は極端である。たとえば、専門家は巨大地震の予知情報を、パニックを防ぐためにかくしているというような誤解を書いた記事さえあって、地震の予報ができるほど研究は進んでいないという基本的な知識の普及ができ

ていない。

中国では、国家地震局を中心として、国や各地域が、地震予報を出すという方針をとり続けてきた。中国での大きな成果は、1975 年 2 月 4 日の海城地震(M7.3)に対し、長期、中期、短期および臨震という段階的予報を的確に出して、震災を軽減したことであった。

地震予報は困難な事業であるが、すでに内陸地震で大成功をおさめた海城地震のような事例があることを忘れてはいけない。失敗した例をもとに研究をあきらめるのではなく、成功した例があるから予算を投入して研究を続けようというのが、震災を軽減することを国民の悲願とする日本の基本方針でなければならない。

日本学術会議の対外報告では、『国土の基本情報として、地震など固体地球の現象を精密に把握し、そのデータを蓄積、流通させ、データの内容を広報する専門の機関として、国に「地震・火山庁」を設置する』という項目がある。科学者個人でも学会でもない、行政が持つ基本情報を市民に伝える公的な機能が国の責任で用意され、常に広報することで、はじめて知識の普及ができるのである。

大地震の長期予測 長期予測の精度を上げる

日本列島にあるプレート境界では、海のプレートが陸のプレートの下にもぐり込むタイプの境界がほとんどで、陸と陸とが接している境界は中部地方にほぼ南北に 1 本と、伊豆の北端にある。海のプレートがもぐり込んでいく境界では、プレートとプレートのかみ合っている強さが、その境界に沿って、どのように分布しているかを知ることが、地震の準備過程を理解するために重要である。

GPS(126 ページ)の連続観測による地表のひずみのデータは、このかみ合い方をとらえるために利用できる。たとえば、静岡県御前崎あたりの変動のパターンを解析すると、御前崎沖すぐの地下、深さ 10km~20km 部分のプレート境界が、しっかりとくっついていて、その部分で陸を押し込んでいくことがわかってきた。

プレート境界では、プレートの相対運動を測って、その量に見合うだけの地震が起こっているかどうかを、計算して確かめることができる。計算をしてみると、南海トラフでは、プレート間の動きのほとんど 100 パーセントが地震になっていることがわかったが、他の所では、かならずしもそうではなくて、プレートの相対運動の量に相当する地震が起こっていない所もあることがわかってきた。

そこで、プレートの相対運動に対する地震の起こった効率を、地震学ではカップリングの大きさとして表す。南海トラフのカップリングは、100 パーセントということになる。カップリングの小さい所ではプレートはスルスルともぐり込んでいくか、ゆっくりと、ずれが起こっているかであろう。実際、大揺れがなくて津波だけがおそってくる津波地震があるということは 162 ページで述べた。

活断層の地震 大地震発生の可能性を知る

大地震の起こりうるプレート境界や活断層をいねいに調べていくことが、大地震の長期予測の精度を上げていくことになるであろう。日本の陸地で、1 回の大地震による活断層のずれの最大記録は、根尾谷断層の 8m である、1891 年の濃尾地震を起こしたずれであるが、そのとき地表地震断層の走った距離も、80km におよぶ日本記録だった。南海地震などのプレート境界地震では、もっと大きく動いているだろうが、海底なので見えないから、濃尾地震の記録は、人が見た地震断層の日本記録なのである。

断層の新しいずれがあったとしても、それが急激に起こらずに、ゆっくりと続いている動きであれば、大地震を起こすことはない。このような動きを、クリープ運動という。たとえば太平洋プレートと北アメリカプレートの境界のカリフォルニア州のサンアンドレアス断層の一部にはクリープ運動が見られ、そこでは大きな地震がなく、クリープ運動をしていない部分に大地震が起こる。日本では、明らかにクリープ運動をしている活断層はまだ見つかっていない。

ある地域の近くに、活断層がたくさんあったり、地震のくり返し間隔の短いプレート境界があれば、それだけ強震動を受ける頻度が高くなる。内陸の活断層に関しては、今までの調査結果をもとにした、それぞれの活断層の位置、長さ、活動度から、強い揺れを受ける地域を計算することができる。また、歴史時代の巨大地震の記録などから海域の活動度も計算する。ある試算によると、震度 5 以上の揺れを 100 年間に 4 回以上受ける地域は、中部から北陸、九州東南部、東北の東部、北海道南東部などに

あるといわれる。

地震予知研究 50 年の歴史 地震予知連絡会の役割

日本で地震予知研究が組織的におこなわれるきっかけとなったのは、1960 年春の地震学会での提案であった。1962 年には地震予知研究の計画書がまとめられ、1963 年には、地震予知研究を進めることが日本学術会議から政府に勧告され、これがきっかけになって、測地学審議会が国に建議して、地震予知研究計画が国の事業の一つとして始められた。

1969 年、この研究事業から得られるデータをもとに情報を交換するための地震予知連絡会が、国土地理院長の私的諮問機関として発足した。ここで重点的に観測する特定観測地域や観測強化地域が指定された。1978 年、大規模地震対策特別措置法ができて、翌年それにもとづく地震防災対策強化地域が、東海地域に指定された。この東海地域に対して、気象庁長官の私的諮問機関として地震防災対策強化地域判定会が設置された。

1995 年兵庫県南部地震の後、地震防災対策の強化を目的に地震防災対策特別措置法が制定され、それにもとづいて、観測計画を企画する政策委員会と、観測結果を検討し長期予測をおこなう調査委員会を含む地震調査研究推進本部が総理府(現在の内閣府)に設置された。日本全域の地震に関する国の見解が、この調査委員会から発表される。

また、2001 年現在、日本の国土の地震に関する基本観測網として、高感度地震計、広い周波数帯域を持つ高性能地震計、強震動を記録する強震計が全国に置かれ、地表の動きを記録する GPS 観測網が整備された。さらに、活断層の調査も進められている。

地震活動期と静穏期 何回トラフの次の巨大地震

数十年間、西南日本が地震の静穏期だったために、日本の巨大地震はおもに東日本の海で起こると思っていた人もいた。しかし、内陸の活断層帯で起こる M7 クラスの地震による被害が大きいことは、西南日本の地震活動期の最初となった 1995 年阪神・淡路大震災で、あらためて思い起こされた。

大地震の予測で、今もっとも詳しい報告が多く出されているのは、南海トラフの巨大地震についてであろう。それに関連する西日本の地震活動の特徴を見ることにしよう。

プレート境界地震のとき、海溝やトラフに向かう岬は隆起し、次の地震までに、その大部分が沈降して元に戻る。ある地震のときの隆起が少ないと次の地震が早く、逆に大きいと遅くなるという傾向がある。これを表現するモデルは、時間予測モデルと呼ばれている。室戸岬や房総半島、奄美諸島の喜界島で、このモデルが成り立つことがわかった。この考えで、室戸岬の北西にある室津港の変位量を用いて解析した結果、次の南海地震は 2040 年ごろと予測された。

1600 年以降のデータだけを用いて、地震のくり返し時間間隔の平均を求めて、それから次の巨大地震を予測すると 2061 年という結果になり、ばらつきを考慮すると、早くて 2025 年ごろになる。

南海地震の 50 年くらい前から地震後 10 年くらいの間、西南日本内帯で地震活動が活発化すること(次項参照)を利用して、次の南海地震を予測すると 2030 年代後半になる。これら 3 つの異なる考え方からの結果を総合すると、次の南海地震の発生時期は 2040 年、早目に見つめると 2030 年ということになる。

大地震前のドーナツパターン 西南日本内帯の地震活動期

南海トラフの巨大地震の前に、周辺の内陸部の地震活動が活発化する傾向があり、その現象は地震分布の形からドーナツパターンと呼ばれる場合もある。

南海トラフのプレート境界巨大地震の、約 50 年前から約 10 年後の期間に、西南日本内帯の浅い地震の活動度が高くなるという報告がいくつかある。この約 60 年の期間を見ると、西南日本内陸部の被害地震の発生率は、それ以外の期間の約 4 倍である。被害地震だけでなく、小さい地震を含む有感地震でも同じような傾向が見られる。南海トラフの巨大地震は 90 年から 150 年程度の時間間隔でく

り返し発生するから、西南日本の地震活動には、活動度の高い時期と低い時期があることになる。前回の活動期は 1891 年の濃尾地震から 1948 年の福井地震まで、次の活動期は 1995 年兵庫県南部地震が始まりで 60 年ほど続くということになる。

活動期の期間には内陸の活断層帯の大地震が多く、活動期の終わりに近い時期に南海トラフの巨大地震が起こる。内陸の大地震は、おもに 1000 年以上というような長期間動いていない活断層帯に起こるが、その中でも最近中小規模の地震が増えている活断層帯は、とくに注目しなければならないであろう。実際、兵庫県南部地震も、長い間動いていなかった六甲・淡路活断層帯に発生したが、その断層帯には、この数十年、中小規模の地震が増えていた。

M7 以上のクラスの地震の起こる場所は、ほぼわかっているもので、それぞれの場所が、地震サイクルの上で、どの時期にあるかを知るための調査をするのが、地震予測の基本となるであろう。

地震活動の空白域 3つの種類の空白域がある

大地震前にその震源領域近くの地震活動が静かになることがあるが、それを地震空白域という。プレート境界の巨大地震の起こりうる所で、その平均的なくり返し時間間隔から見て、長い間大きい地震が起きていない所を第 1 種地震空白域という。巨大地震が次つぎと起こって、その空白域のひずみを解消していく。取り残されている場所に、近い将来大地震が起こる可能性が高い。1973 年の根室半島沖地震(M7.4)や 1978 年のメキシコのオアハカ地震(M7.8)などは、この考えで発生前に予測されていて実際に起こった事例である。

一方、内陸の活断層帯などで、大地震の前に中小規模の地震の静穏化現象が見られることがあり、それを第 2 種空白域と呼んでいる。空白域が広いほど、また静穏期間が長いほど、直後の地震は大きい。さらに、第 3 種空白域という考え方を提唱する研究者もいる。これは、おもに陸地の活断層帯などに、本来帯状に連なった地震分布があるはずであるのに地震分布の空白が見られる所をいう。

たとえば東北地方の日本海側に北由利断層帯がある。ここでは 1644 年の地震以来、1914 年までに、M7 クラスの地震が 8 回も次つぎと起こったことが知られており、まだ動いていない部分が残っていることもわかっている。その残っている場所には、大地震が起こる可能性が高いと思うのが自然であろう。秋田の人々がこの事実を知っていることが、防災のために何よりも大切である。

地震は岩盤の破壊現象だから、未破壊の所にいずれ地震が起こるのだが、本来起こる所かどうか、過去のデータをいつから見るかなど、空白域をどうやって見つけるかが今後の課題である。

地震の前兆と直前予報 地震予報の成功例

大地震に先行するいろいろな種類の現象がある。1944 年の東南海地震では、当時の陸地測量部が、ちょうど精密水準測量をおこなっていたので、直前の前兆現象がとらえられた。測量結果に 800m の区間で 3mm もの大きな誤差が出たので、何回も確かめているうちに大地震が起こり、直前の地面の動きをとらえることができた。

このような地殻変動の他にも、大地震の直前の前兆現象として、地下水位の変動、地下水や地下ガスなどの地球化学的な変化、電磁気学的な変動など(第 5 章)、多くの種類の現象が知られている。また、それらのセンサーの働きをする動物異常も知られている。しかし、これらの宏観異常現象が多くの観測点で系統的に記録された例が少なく、発生のしくみがわかるほどには研究が進んでいない。

大地震の直前、本震の震源近くに前震が起こることがあるのは 2 章でもふれたが、地震の群が前震であるという判断は、本震があつて初めてできることであり、地震の直前予報に前震のデータを活用するのは、他の現象に関する情報がそろっていないと困難である。

地震予報の世界初の成功例となった、1975 年 2 月 4 日夕刻の中国海城地震のとき、臨震予報は、2 月 4 日午前中に出了された。工場では生産を止め、人々は厳寒の広場に避難した。ある村では映画を 4 本用意して広場で上映したが、2 本目の上映中に本震をむかえた。一方、1976 年 7 月 28 日の唐山地震(M7.8)では、中期予報で工場の補強を実行し、7 月 17 日には唐山市で会議を開いて前兆現象のデータを把握しながら臨震予報を出す時期を失し、24 万人余の死者を出した。

地震予知と震災軽減 地震速報と余震の予報

日本では、1995 年兵庫県南部地震の後、地震の研究が地震予知研究にかたよっているという批判の声が大きくなって、地震学者たちの多くが、地震予知というキーワードを使うことを意識してさける傾向が強くなってしまった。そのために、地震の前兆現象の研究に取り組もうという人が減っているのが残念である。

1998 年 8 月に測地学審議会が「地震予知のための新たな観測研究計画の推進について」を、内閣に対して建議した。この建議は、地震予知の実用化に向けて、4 つの段階を踏む進み方を示している。要約すると、(1)日本列島の全体にわたる地下構造の不均質性と、ひずみやストレスの状態のゆらぎを知る。(2)この知識をもとに、多様な地殻活動と異常現象の物理過程を理解する。(3)その理解をもとに、地殻活動の推移を予測する。(4)この実績を積み上げて地震発生を予測する。

一般的な地震予知が実用化されるのは遠い将来であろうが、地震現象ですでに実現している地震予測もある。たとえば、余震の予測である。気象庁は 1998 年から、大地震の直後に余震の発生を予測して規模と確率を発表するようになった。2000 年 10 月 6 日 13 時 30 分の鳥取県西部地震の後、まず、15 時 30 分に基本的な情報を、17 時 40 分には、「本震から 24 時間以内に M6.0 以上の余震が発生する確率は 40 パーセント程度……」と予報した。7 日 16 時にも次の予報を出した。実際は M5.2 の余震で最大震度 5 弱の揺れがあったり、M5.4 の余震があったりした。余震に限る予報ではあるが、このような情報が、震災後の復旧計画などに参考になることが期待される。

強震動と震災軽減 日本地震工学会の誕生

いうまでもなく、地震予知で震災を防止することはできない。強震動に備えて、都市の耐震構造を作り上げていかなければならないが、それを実現させるためには、地震の長期予測によって大地震発生の可能性を知って、その大地震が発生したときの強震動の地域的な分布を知ることが必要である。活断層の調査と都市の地下構造の調査は、そのための基礎的な情報を得る重要な調査なのである。

地震波が地表に到達して地表が揺れる。その揺れのデジタル記録を使って、その地震計を置いてあった地点が、どのような動きをしたかを詳しく分析していくと、いろいろなことがわかってくる。ある地点の運動した速度の最大値が、秒速 80cm から秒速 100cm の値を超える地域では、一般に日本では震災が大きくなる傾向があるという。たとえば、2000 年 10 月 6 日の鳥取県西部地震(M7.3)による揺れでは、米子市の地震計が記録した秒速 54cm が最大値、震央近くでも秒速 30cm 程度であった。また、加速度のほうは、科学技術庁(現在の文部科学省)の観測網では、725Gal の南北方向の記録が最大だった(加速度については 88、136 ページ)。

このように、ようやく強震動のデータがこまかく論じられるようになって、建築工学、土木工学、地盤工学、機械工学などと地震学とが、しっかりと連携しながら、強震動が発生するしくみを調べ、震災を軽減する方策を見いだしていくための手段がそろってきた。さらに、救援システムや行政の対応、教育、医療システム、心のケアまでを幅広く含んで、震災軽減策を総合的に取り上げた、念願の日本地震工学会が 2001 年に発足した。

地震発生の確率

政府の地震調査委員会が発表した大地震の発生確率では、2001 年 9 月末現在、宮城県沖の M7.5 以上の地震の場合がもっとも高い。この地域で今後 30 年以内に大地震が発生する確率は 90%以上となる。その他、東海で 37%、糸魚川・静岡構造線活断層で 14%、東南海 50%、南海 40%などと発表されている。調査が進んだ地域の発表で、もっと高い所があるかもしれない。

内陸の活断層帯のように大地震のくり返し時間間隔が大きくばらつく場合には、今後 30 年の発生確率はほとんどの場合数%にしかならないということも忘れてはならない。

予想される震災の規模が大きい場合、確率が小さくても対策を実行するのが防災の基本である。

参考文献

『地震の事典』	宇津徳治編	朝倉書店
『地震防災の事典』	岡田恒男・土岐憲三編	朝倉書店
『中国の地震予知』	尾池和夫	NHK ブックス
『活動期に入った地震列島』	尾池和夫	岩波科学ライブラリー
『日本地震列島』	尾池和夫	朝日文庫
『地震発生のしくみと予知』	尾池和夫	古今書院
『火山の科学』	久保寺章	NHK ブックス
『地震はどこに起こるのか』	島村英紀	講談社
『地震学百年』	萩原尊禮	東京大学出版会
『活断層』	松田時彦	岩波新書
『地震－その本性をさぐる』	茂木清夫	東京大学出版会
『地震の科学』	パリティー編集委員会	丸善
『最新・地球学』	宮本貢	朝日新聞社
『地球のしくみ』	浜野洋三	日本実業出版社
『動く大地を読む』	松田時彦	岩波書店
『深海底の科学』	藤岡換太郎	日本放送出版協会
『地震学』	宇津徳治	共立出版
『プレート・テクトニクス』	上田誠也	岩波書店
『理科年表読本地震』	安藤雅孝・吉井敏尅	丸善
『地震予知はできる』	上田誠也	岩波科学ライブラリー
『野島断層』	中田高・岡田篤正	東京大学出版会

参考ホームページ

「日本地震学会」
<http://www.soc.nii.ac.jp/ssj/>
「IASPEI（国際地震学地球内部物理学協会）」
<http://www.iaspei.org/>
「地震予知連絡会」
<http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/ccephome.html>
「地震調査研究推進本部」
<http://www.jishin.go.jp/main/welcome.htm>
「国土地理院」
<http://www.gsi.go.jp/>
「気象庁」
<http://www.kishou.go.jp/>
「地質調査総合センター」
<http://www.gsj.go.jp/HomePageJP.html>
「防災科学技術研究所」
<http://www.bosai.go.jp/jindex.html>

著者略歴

尾池 和夫(おいけ かずお)

1940 年東京都に生まれた。私立土佐高校、京都大学理学部地球物理学科を卒業。京都大学理学博士。地震学会委員長、日本学術会議地震学研究連絡委員会委員長、同阪神・淡路大震災調査特別委員会委員、京都大学理学部長、京都市、大阪市などの活断層調査委員会委員長などを歴任。2001 年 9 月現在、京都大学副学長・大学院理学研究科教授(地球惑星科学専攻)、地震予知連絡会委員。

主な著書に、岩波書店「世界の変動帯」、岩波書店「日本列島の形成」、NHK ブックス「中国の地震予知」、東方書店「中国の地震・日本の地震」、吉井書店「インドネシアの旅ージャワとバリの火山を訪ねて」、古今書院「地震発生のしくみと予知」、朝日文庫「日本地震列島」、岩波書店「活動期に入った地震列島」、宝塚出版「俳景ー洛中洛外・地球科学と俳句の風景」など。

俳人協会会員。氷室俳句会同人。

編集協力 (株)オリンポス/伊藤笑子

イラスト (株)オリンポス(有)熊谷事務所

ナツメ社の書籍・雑誌は、書店または小社ホームページでお買い求めください。

<http://www.natsume.co.jp>

地震

2001 年 12 月 26 日発行

著者 尾池和夫 © Kazuo Oike, 2001

発行者 田村正隆

発行所 株式会社ナツメ社

東京都千代田区神田神保町 1-52 加州ビル 2F(〒101-0051)

電話 03(3291)1257(代表) FAX 03(3291)5761

振替 00130-1-58661

制作 ナツメ出版企画株式会社

東京都千代田区神田神保町 1-52 加州ビル 3F(〒101-0051)

電話 03(3295)3921(代表)

印刷所 東京書籍印刷株式会社

ISBN4-8163-3029-1

Printed in Japan

〈定価はカバーに表示してあります〉

〈落丁・乱丁本はお取り替えます〉

本書の一部分または全部を著作権法で定められている範囲を越え、ナツメ出版企画株式会社に無断で複写、複製、転載、データファイル化することを禁じます。